

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Porovnání provozních nákladů při pálení na
plazmovém dělicím stroji

Operating Cost Comparison by Cutting on Plasma
Dividing Machine

Student:	Bc. Miroslav Fajčák
Vedoucí diplomové práce:	Dr.Ing. Jaroslav Melecký

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Fajčák**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Porovnání provozních nákladů při pálení na plazmovém dělicím stroji**
Operating Cost Comparison by Cutting on Plasma Dividing Machine

Zásady pro vypracování:

V podmínkách vybraného provozu proveďte porovnání nákladovosti spotřebního materiálu při pálení na plazmovém dělicím stroji od firmy MGM, s.r.o.

V rámci zadání zpracujte:

- analýzu a rešerši dané problematiky
- porovnání technologií pálení materiálu
- možnosti a způsoby pálení plazmovým hořákem
- porovnání nákladovosti spotřebního materiálu (trysky, elektrody atd.) dodávaného firmou Hypertherm, Inc. a konkurencí
- sledování životnosti spotřebního materiálu
- vyhodnocení provedených analýz
- návrh řešení údržby palčícího stroje

Bližší specifikaci nutných technických údajů provedou firmy Hypertherm, Inc. (příp. její pobočky) a MGM, s.r.o.

Seznam doporučené odborné literatury:

HAVLÍČEK J. a kol. *Provozní spolehlivost strojů (2. přepracované vydání)*. Praha, SZN 1989. 616 s. ISBN 80-209-0029-2.
ZIEGLER, J., HELEBRANT, F. *Technická diagnostika výrobních zařízení*. VŠB Ostrava, 1992. 175 s. ISBN 80-7078-111-4.
Firemní materiály, manuály a technická dokumentace firmy Hypertherm, Inc.
POŠTA, J., ČERNOVOL, M. aj. *Renovace strojních součástí*. SVÚM a.s. – ČTS, Praha, 1998. 160 s. ISBN 80-902015-6-3
<http://cs.wikipedia.org>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Dr. Ing. Jaroslav Melecký**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

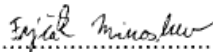
V Ostravě23.5.2011.....

.....*Jan Mikoska*.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 25.5.2011


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Miroslav Fajčák

Adresa trvalého pobytu autora práce: Okružní 926, Orlová – Lutyně, 735 14

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

FAJČÁK, M. *Porovnání provozních nákladů při pálení na plazmovém dělicím stroji: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2011, 75 s. Vedoucí práce: Melecký J.

Diplomová práce se zabývá problematikou tepelného řezání materiálu, zejména pak řezáním plazmou. V úvodu práce popisují situaci ve firmě, v které pracují. V dalších kapitolách popisují rozdílné technologie tepelného řezání. A to řezání laserem, kyslíkem a plazmou včetně jejich vzájemného porovnání. Které není jednoznačné a mělo by se posuzovat podle analýz se zohledněním všech sledovaných vlivů. Dále jsem popsal řešení údržby pálícího stroje a to zejména plazmy. Cílem této práce je zjistit a následně porovnat životnost a nákladovost spotřebního materiálu (trysky, elektrody atd.) dodávaného firmou Hypertherm, Inc. a konkurencí

ANNOTATION OF MASTER THESIS

FAJČÁK, M. *Operating Cost Comparison by Cutting on Plasma Dividing Machine: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2011, 75 p. Thesis head: Melecký J.

This thesis deals with the thermal cutting of material, especially cutting plasma. The introduction describes the situation in the company, in which they work. The next chapters describe the different thermal cutting technology. This laser cutting, oxygen plasma, including their comparison. What is not clear and should be judged according to the analysis, taking into account all the observed effects. Furthermore, I described the solution to cutting machine maintenance, especially plasma. The aim of this work is to identify and then compare the lifetime and cost of consumables (nozzle, electrode, etc.) provided by Hypertherm, Inc.. and competition .

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	- 8 -
1 Úvod.....	- 9 -
2 Porovnání technologií řezání materiálu	- 12 -
3 Laserové řezání.....	- 15 -
3.1 Zdroj laserového paprsku	- 15 -
3.2 Laserové oxidační řezání.....	- 16 -
3.2.1 Laserové oxidační řezání nelegovaných oceli	- 17 -
3.3 Laserové tavné řezání.....	- 18 -
3.3.1 Laserové tavné řezání vysoce legovaných oceli	- 18 -
3.4 Laserové sublimační řezání	- 19 -
3.5 Plyny pro laserové řezání	- 19 -
3.5.1 Laserový plyn.....	- 19 -
3.5.2 Řezací plyny.....	- 20 -
4 Řezání kyslíkem.....	- 21 -
5 Plazmové řezání.....	- 26 -
5.1 Plazmový oblouk	- 27 -
5.2 Sled fází v procesu plazmového řezání	- 28 -
5.3 Varianty metody plazmového řezání	- 29 -
5.3.1 Plazmové tavné řezání s neoxidačním plazmovým plynem	- 29 -
5.3.2 Plazmové tavné řezání s oxidačním plazmovým plynem.....	- 29 -
5.4 Typy hořáků pro plazmové řezání	- 30 -
5.4.1 Plazmové tavné řezání s oxidačním plazmovým plynem.....	- 32 -
5.4.2 Plazmové řezací hořáky na proud sekundárního plynu	- 33 -
5.4.3 Plazmové řezání se vstřikováním vody	- 35 -
5.5 Snížení negativních ekologických vlivů při plazmovém řezání	- 36 -
5.5.1 Plazmové řezání s vodní clonou.....	- 37 -
5.5.2 Plazmové řezání s vodní lázní.....	- 38 -
5.5.3 Plazmové řezání pod proudem vody	- 39 -
5.6 Řezný výkon při plazmovém řezání.....	- 39 -
5.7 Plazmové plyny.....	- 41 -
6 Porovnání řezání laserem, plazmou a kyslíkem	- 42 -
7 Údržba stroje	- 44 -

7.1	Preventivní údržba	- 44 -
7.1.1	Zdroj napájení	- 44 -
7.1.2	Chladicí systém	- 45 -
7.1.3	Hlavní těleso hořáku.....	- 45 -
7.1.4	Průtoky plynů	- 46 -
7.1.5	Kabelová spojení	- 47 -
7.1.6	Zapalovací konzola.....	- 47 -
7.1.7	Uzemnění systému	- 47 -
7.2	Šablona harmonogramu preventivní údržby.....	- 48 -
8	Porovnání nákladovosti spotřebních dílů	- 49 -
8.1	Úvod do problematiky.....	- 49 -
8.2	Stanovení životnosti spotřebního materiálů	- 51 -
8.3	Složení Ag - elektrody.....	- 54 -
8.4	Hafnium.....	- 55 -
8.5	Výsledky provedené analýzy	- 56 -
8.6	Cenové porovnání	- 60 -
8.7	Kalkulace provozních nákladů	- 60 -
9	Závěrečné hodnocení	- 61 -
10	Seznam použité literatury.....	- 62 -
11	Přílohy	- 63 -

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Benchmark	označení výrobce neoriginálního spotřebního materiálů
CNC	číslicově řízený stroj
DP	diplomová práce
EBC	metoda s elektronovým paprskem
HPR	zdroj napájení
LBC	metoda s laserovým paprskem
Nd:YAG krystal	izotropní krystal dopovaný ionty neodymu
OEM	označení výrobce originálního spotřebního materiálů
OFC	řezání kyslíkem
PAC	metoda plazmového řezání

1 Úvod

Pracuji ve firmě, která se zabývá výrobou ocelových konstrukcí pro důlní provozy, elektrárny a další odvětví. Ve firmě mimo jiné využíváme technologie na tepelné dělení materiálů.

Do srpna 2008 jsme využívali jenom technologii strojního řezání pomocí kyslíku. Jedná se o stroj od firmy MGM. Pálicí stroj je robustní portálové konstrukce s vynikajícími statickými i dynamickými vlastnostmi. Konstrukce je opatřena přesně opracovaným lineárním vedením s broušenými ocelovými tyčemi a broušenými ozubenými hřebeny v bez mazném provedení. Portál jezdí po robustní a přesně opracované dráze a jeho pojezd zaručují výkonné servopohony na obou stranách portálu.

Souhrn všech uvedených řešení zaručuje:

- vysokou přesnost pálení a věrnost dodržování řezné kontury.
- vynikající statické a dynamické vlastnosti stroje.
- maximální využití pracovních a přejezdových rychlostí zvyšující produktivitu stroje.

Od srpna 2008 jsme začali využívat technologii řezání plazmou. Naše zkušenosti s touto technologií byli minimální. Firma zakoupila rovněž stroj od firmy MGM a to NC pálicí stroj OMNISCUT 5600. Portál tohoto stroje je osazen jak plazmovým hořákem, tak čtyřmi hořáky pro řezání kyslíkem. V současné době je na tomto stroji z 95% využívána technologie řezání plazmou.

Stroj je vybaven strojním plazmovým zdrojem HPR 260 firmy – Hypertherm.

Tento zdroj se využívá pro:

- CNC-plazmové řezání při vysoké kvalitě v rozsahu 0,5 – 35 [mm] (v závislosti na materiálu) a současně pro plazmové značení
- maximální kapacita řezu do 64 [mm]

- HyPerformance - technologie nabízející vysokou kvalitu řezu, téměř bez otřepů, a výrazné zvýšení životnosti spotřebních dílů
- HyFlow – technologie pro stabilizaci oblouku plazmy přesně vůči středu elektrody - prodloužení životnosti spotřebních dílů
- řezný proud: 30 - 260 [A], plynule nastavitelný
- plazmový plyn: O₂, N₂, F₅, H₃₅, vzduch
- ochranný plyn: O₂, N₂, vzduch
- napájení: 3 x 400 [V], 50/60 Hz, 125 [A]
- příkon: 74 [kVA]
- zapalování: vysoká frekvence
- hmotnost: 567 [kg]
- rozměry (D x Š x V): 1 150 x 820 x 1 190 [mm]
- strojní hořák: HPR 130/600 [A]
- včetně manuální nebo automatické plynové konzole a separátní zapalovací konzole
- včetně propojovacího svazku kabelů a hadic 15 - 75 [m]
- včetně sady spotřebních dílů pro první spuštění zařízení

rozsah pálení: kvalitní řez / propal / dělicí řez:

- uhlíkaté oceli: 0,5 – 35 / 35 / 64 [mm]
- legované oceli: 1,0 – 30 / 30 / 50 [mm]
- hliník: 1,5 – 30 / 30 / 50 [mm]

Na obrázku 1 vidíme pálicí stroj OMNICUT 5600 se dvěma hořáky na řezání plazmou.



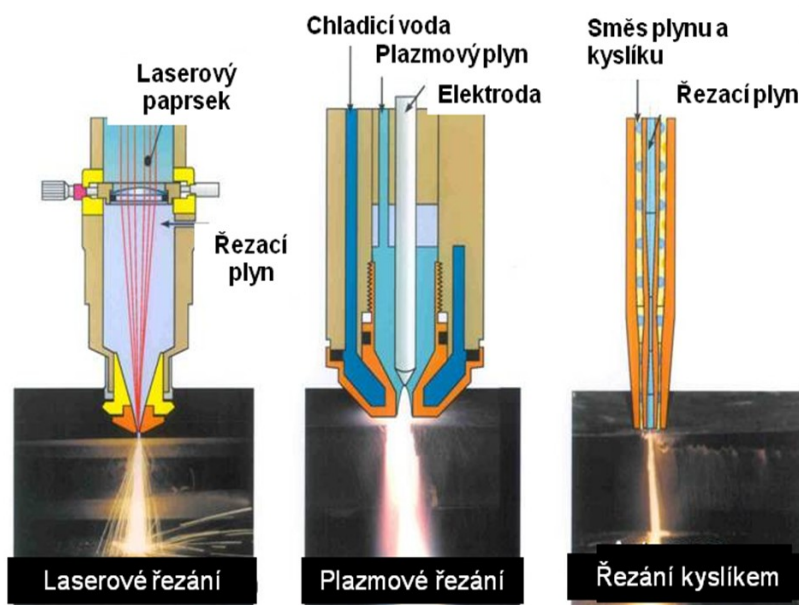
Obrázek 1 Pálicí stroj OMNICUT

V mé práci se budu zabývat problematikou plazmového řezání resp. stanovením životností a nákladovosti spotřebního materiálů dodávaného firmou Hypertherm, Inc. a konkurencí.

2 Porovnání technologií řezání materiálu

Tepelné řezání – řezání laserem, plazmou a kyslíkem – je jedním z pilířů výrobních procesů v kovozpracujícím průmyslu. V mnoha oblastech se dnes všechny tyto tři metody používají společně. Jsou vhodné k úpravě hran ke svařování, pro vyřezávání geometricky složitých dílů nebo pro řezání trubek a profilů. Všechny metody tepelného řezání mají dva společné rysy: přesnost aplikace energie a vysoce energetický tok plynu.

Tepelné řezání slouží k výrobě dílů, které lze dále použít bez dalšího opracování. Předpokladem pro vysokou kvalitu řezu je přesný řezný paprsek a stabilní vodící zařízení s nízkými vibracemi a vysokou přesností opakování. Plnění náročných požadavků na přesnost řezných kontur (na geometrii povrchu řezů a rozměrovou přesnost), například při úpravě hran ke svařování nebo při mechanizovaných způsobech svařování, se dosahuje pomocí volně programovatelných číslicově řízených vodících zařízení. Metody řezání laserovým paprskem, plazmou a kyslíkem se řadí do základní třídy „dělení“ a „ubírání“ materiálů. Podle typu tepelného ubírání, viz obrázek 2.



Obrázek 2 Typy tepelného řezání

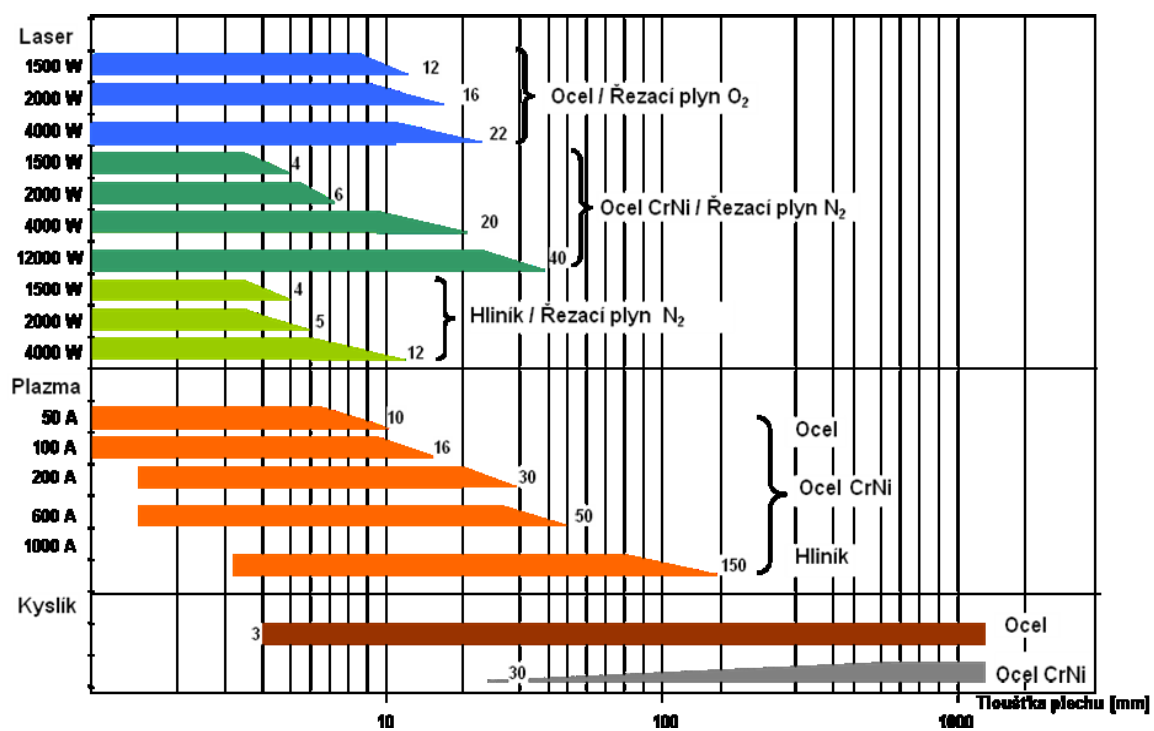
Na obrázku 3 jsou uvedeny různé varianty jednotlivých metod. V této práci se věnujeme pouze řezání laserovým paprskem, plazmovému řezání, a řezání kyslíkem, jinými slovy tepelnému dělení materiálů.



Obrázek 3 Různé varianty jednotlivých metod

Výsledky dosahované jednotlivými metodami řezání se navzájem liší vzhledem ke zvláštním charakteristikám příslušných procesů. Vzájemné porovnávání je proto obtížné.

Z praktických zkušeností víme, že při řezání záleží na typu řezaného materiálu, na tloušťce řezu, na požadované kvalitě řezu a rozměrové toleranci. Znamená to, že každý z uvedených způsobů řezání má jinou konkrétní sféru vhodného uplatnění. Na obrázku 4 je uveden přehled oblastí uplatnění jednotlivých metod tepelného řezání.



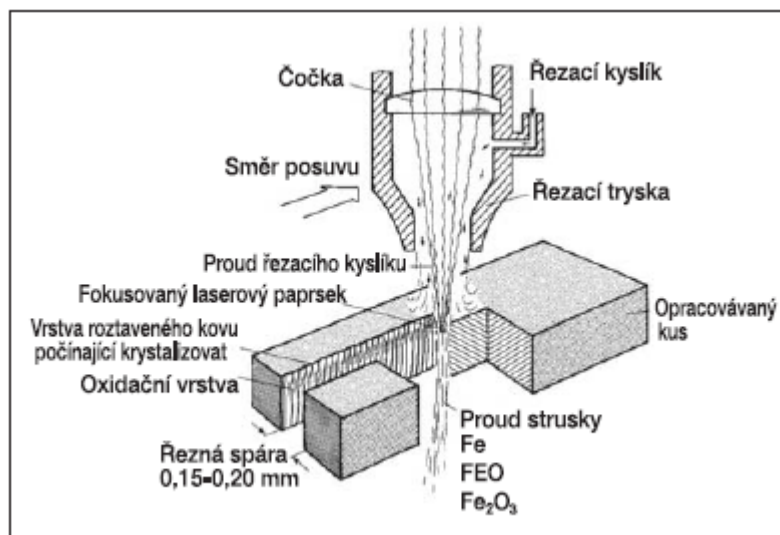
Obrázek 4 Přehled oblastí uplatnění jednotlivých metod tepelného řezání

3 Laserové řezání

Laserové řezání je metoda přesného řezání, při níž lze uplatnit podobné rozměrové tolerance jako u mechanického opracování. K laserovému řezání se kromě tradičních číslicově řízených strojů s vodicím zařízením ve směrech os $x - y$ ve stále větší míře používají robotické systémy pro řezání trojrozměrných kusů. Předpokladem pro kvalitní řezání (včetně řezů na ostrých rozích a hrotech), je automatické zadávání parametrů (kapacita laseru upravená podle příslušné řezné rychlosti v průběhu řezání vzhledem k řezanému tvaru).

3.1 Zdroj laserového paprsku

Jako zdroj energie ke generování tepla, které vyžaduje proces laserového řezání, se používají lasery CO_2 i lasery na bázi Nd:YAG krystalů. Zvlášť vysoké efektivnosti a výkonu lze dosáhnout s lasery CO_2 . Oscilace tříatomové molekuly CO_2 vyvolává infračervené světlo, tj. viditelné laserové paprsky o vlnové délce 10,6 μm . Abychom na řezaném povrchu a v blízkosti řezu získali teplo potřebné k řezání laserovým paprskem, musí se zajistit fokusaci laserového paprsku pomocí vhodných čoček, případně zrcadlových čoček. V důsledku absorpce laserového paprsku se materiál zahřeje na teplotu potřebnou k řezání – na zápalnou teplotu při laserovém oxidačním řezání a na tavnou teplotu při laserovém tavném řezání. Princip procesu laserového řezání se schematicky podává na obrázku 5. Hlavní výhodou laserového řezání je úzká řezná spára, úzká tolerance u opracovávaných kusů, přesné řezné kontury a nízká tepelná ztráta.



Obrázek 5 Schematické znázornění principu řezání laserovým paprskem

Laserové řezání se dělí na tři procesní varianty, a to:













- Laserové oxidační řezání
- Laserové tavné řezání
- Laserové sublimační řezání

3.2 Laserové oxidační řezání

Při laserovém oxidačním řezání se řezaný materiál v okolí řezné spáry zahřívá laserovým paprskem na zápalnou teplotu, tj. u stavebních ocelí 1.150 až 1.200 °C. V toku řezacího kyslíku dochází k hoření materiálu v rýze – ten vytváří tekutou strusku, kterou z řezné spáry vypuzuje kinetická energie toku řezacího kyslíku. Část potřebné energie dodává exotermická reakce řezacího kyslíku s řezaným materiálem a tím umožňuje dosažení vysokých řezných rychlostí v kombinaci s relativně nízkou energií laserového paprsku.

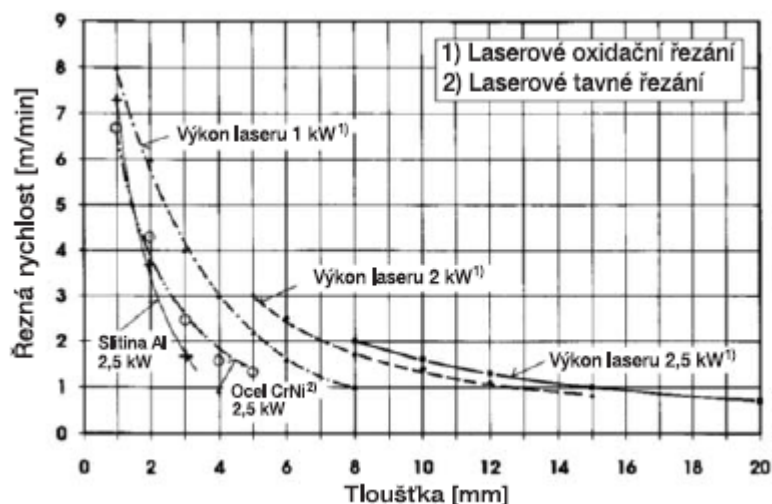
3.2.1 Laserové oxidační řezání nelegovaných ocelí

Nejčastějším způsobem využití laserového oxidačního řezání je opracování nelegovaných a nízko legovaných ocelí. Obrázek 6 ukazuje tvary řezné spáry, vzhled řezných povrchů a typy spár při laserovém oxidačním řezání při tloušťkách od 1 do 10 mm. Možná řezná rychlost závisí na energii laseru, na rozložení hustoty energie v paprsku, ohniskové vzdálenosti čočky, na poloze ohniska a na čistotě plynu.

Laserové oxidační řezy 1500 W CO ₂ laser		Tloušťka plechu v mm	Řezná rychlost m/min	U _l mm	U _r mm	R _z μm	R _a μm	b mm
		1	–	0,02	0,01	7	1	0,18
		2	6	0,03	0,03	11	2	0,21
		3	4,4	0,09	0,03	11	2	0,24
		5	2,8	0,07	0,04	16	3	0,36
		8	1,3	0,12	0,07	39	7	0,37
		10	0,8	0,09	0,13	42	7	0,56

Obrázek 6 Řezné spáry a povrchy řezu na dílcích plechu o různé tloušťce po řezání laserovým paprskem

Obrázek 7 graficky znázorňuje řezné rychlosti laserů o různé energii. Řezné rychlosti uvedené na tomto grafu platí pro rovné řezy a velké konturové řezy. Při řezání tvarů, které jsou citlivé na přehřátí – například ostrých rohů, hrotů a tenkých listů – se odpovídajícím způsobem musí snížit výkon laseru a řezná rychlost a musí se přizpůsobit příslušnému tvaru. Při řezání extrémně jemných filigránských tvarů se používá pulzní mód. Při pulsech zůstává intenzita zachována a mění se jen průměrný výkon laseru. Výkon laseru se tím dá ovládat tak, aby nedocházelo k tavení.



Obrázek 7 Řezná rychlost jako funkce tloušťky plechu

3.3 Laserové tavné řezání

Při laserovém tavném řezání se řezaný materiál taví laserovým paprskem o vysoké intenzitě a z řezné spáry jej vypuzuje řezný plyn, který proudí z řezací trysky a má vysokou kinetickou energii.

3.3.1 Laserové tavné řezání vysoce legovaných ocelí

Laserové tavné řezání je vhodné při řezání vysoce legovaných ocelí a neželezných kovů. Jako řezací plyn se používá dusík a argon; plyn také chrání optiku.

Při laserovém tavném řezání – na rozdíl od laserového oxidačního řezání – se všechna energie musí pomocí laserového paprsku nebo pomocí elektrické energie použít k zahřátí materiálu v řezné spáře tak, aby se roztavil.

Jelikož při laserovém tavném řezání nevzniká mezi řezným plynem a řezaným materiálem exotermická reakce, která by posílila proces řezání, je zde řezná rychlost mnohem menší než při laserovém oxidačním řezání s laserem o stejném výkonu.

Konkrétní výhodou laserového tavného řezání jsou nezoxidované řezné povrchy, což je zvláště výhodné při řezání vysoce legovaných ocelí. Pracuje se s tlakem řezného plynu 15-20 barů, při kterém se viskózní tavenina snadno oddělí od základního materiálu a vznikne jen málo otřepků. Řezací hlavy musí být přizpůsobeny pro vysoké tlaky a totéž platí pro systém přívodu plynu. Při dimenzování přívodů je třeba počítat s vysokou spotřebou plynu.

3.4 Laserové sublimační řezání

Při laserovém sublimačním řezání se řezaný materiál ve spáře samovolně vypařuje účinkem fokusovaného laserového paprsku o vysoké intenzitě a vypuzuje se z řezné spáry tlakem páry a řezacím plynem. Touto metodou se zde nebudeme podrobněji zabývat. Při podrobnějším zkoumání procesů není možné jednotlivé typy řezání vzájemně oddělit.

3.5 Plyny pro laserové řezání

3.5.1 Laserový plyn

Laserový plyn, který je směsí CO_2 , N_2 a He, se musí vyznačovat vysokou mírou čistoty. Směsný poměr je přesně upraven pro jednotlivé typy laserů. Aby laserový plyn, který se dostane do laseru, měl požadovanou míru čistoty, je třeba zajistit speciální přívod.

3.5.2 Řezací plyny

Na volbě správného řezacího plynu závisí ekonomika i kvalita řezání.

Kyslík

Použití vysoce čistého kyslíku (o čistotě vyšší než 99,95 %) je výhodné při laserovém oxidačním řezání nelegovaných ocelí. Lze s ním řezat o 20 % rychleji než s kyslíkem o čistotě pod 99,5 %. Tím se snižují náklady na řezání.

Dusík

Dusík se používá na řezání vysoce legovaných ocelí. Musí být vysoce čistý, aby pokud možno nedošlo ke změně barvy spodního okraje řezu. Nesmí obsahovat kyslík a nesmí být vlhký.

Jiné řezací plyny

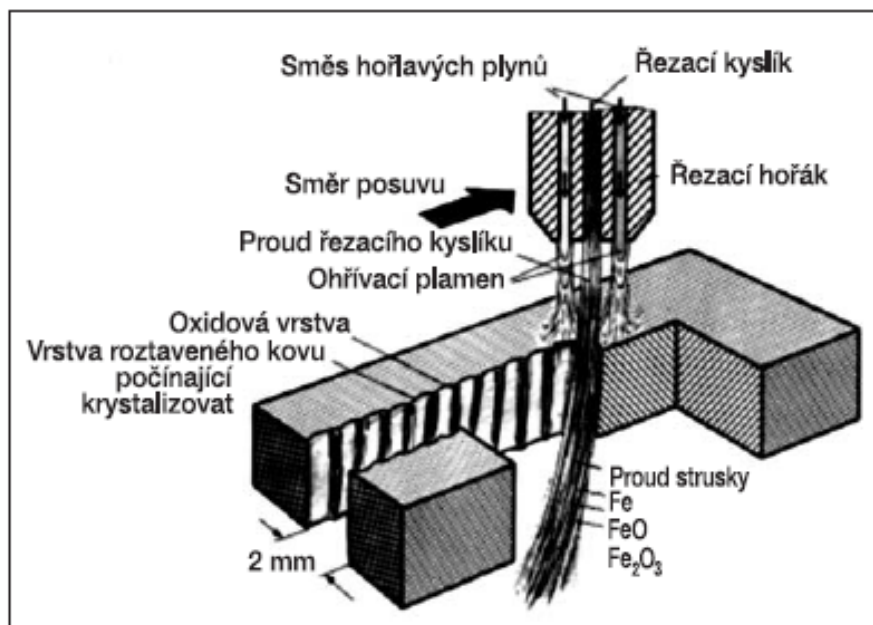
Při řezání hliníku a hliníkových slitin se jako řezací plyny také mohou použít N_2 , O_2 argon a směsi těchto plynů. Čistým argonem nebo jeho směsí s kyslíkem se řeže titan.

4 Řezání kyslíkem

Řezání kyslíkem je nejrozšířenější metodou tepelného řezání. Má nejširší uplatnění z hlediska tloušťky řezaného materiálu – používá se k řezání při tloušťkách od 3 do 3000 mm. Standardní hořáky pro strojní řezání jsou běžně vhodné k řezání plechů o tloušťce 3 – 300 mm. Pro řezání kyslíkem je třeba, aby materiál zahřátý na zápalnou teplotu hořel v proudu čistého kyslíku a vytvářel strusku o nízké viskozitě. Zápalná teplota musí být nižší než teplota tavení. Teplota tavení oxidu musí být nižší než zápalná teplota řezaného materiálu.

Toho se dosahuje u nelegovaných a nízko legovaných ocelí. V důsledku snadné manipulace a relativně nízkých nároků na energii se řezání kyslíkem ve velké míře používá v odvětvích výroby a zpracování oceli. Při řezání kyslíkem se většina energie potřebné k procesu řezání získává spalováním železa v řezné spáře, zatímco při plazmovém řezání a při tavném řezání laserovým paprskem se všechna energie musí přivést zvenčí. U tenkých plechů činí podíl tepla z předehřívacího plamene potřebného pro udržení řezacího procesu přibližně 30 % a u tlustších plátů přibližně 10 %. Ostatní energie potřebná při řezání kyslíkem se generuje z exotermické reakce kyslíku s ocelí.

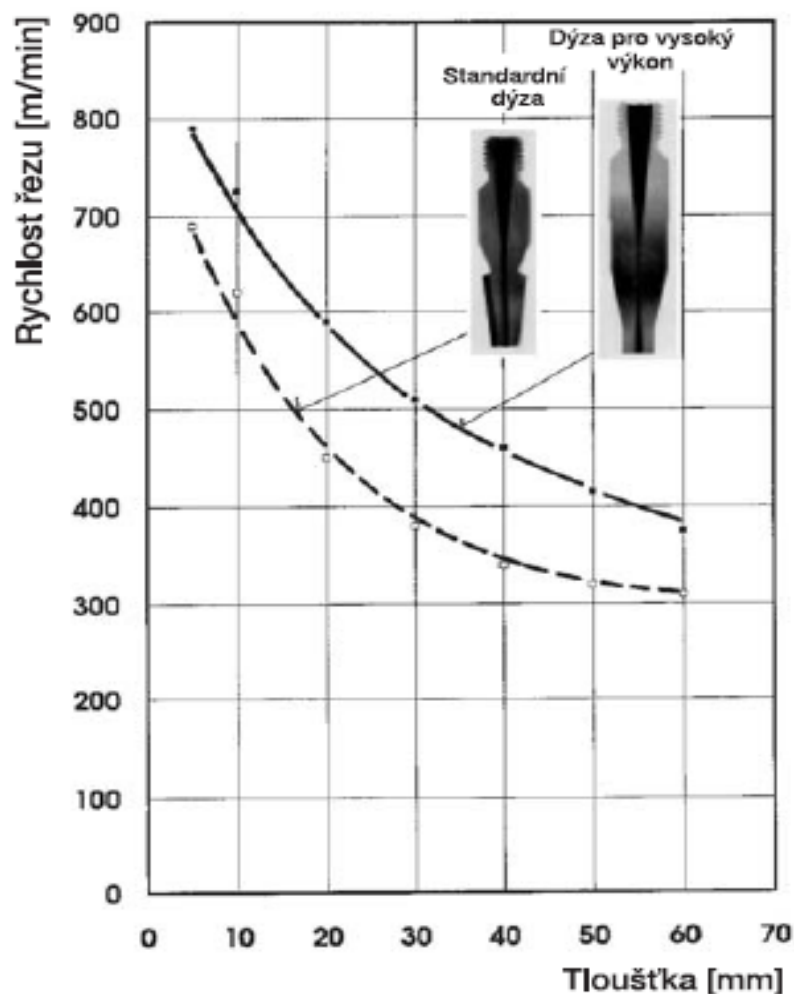
Na obrázku 8 je schematicky znázorněn princip řezání kyslíkem. Předehřívací plamen zahřeje opracovávaný kus na zápalnou teplotu, tj. přibližně 1150 až 1200 °C. Předehřátý materiál hoří v proudu řezacího kyslíku a je vypuzován z řezné rýhy.



Obrázek 8 Schematické znázornění principu řezání kyslíkem

Vlastním nástrojem pro řezání kyslíkem je řezací dýza. Speciální formy řezacích kanálků umožňují, aby proud řezacího kyslíku tryskal z dýzy rychlostí rovnající se 1,5násobku rychlosti zvuku, aniž by za ústím dýzy došlo k jeho rozšíření. Na obrázku 9 vidíme formy kanálku pro řezací kyslík u standardní dýzy a u dýzy pro vysoký výkon.

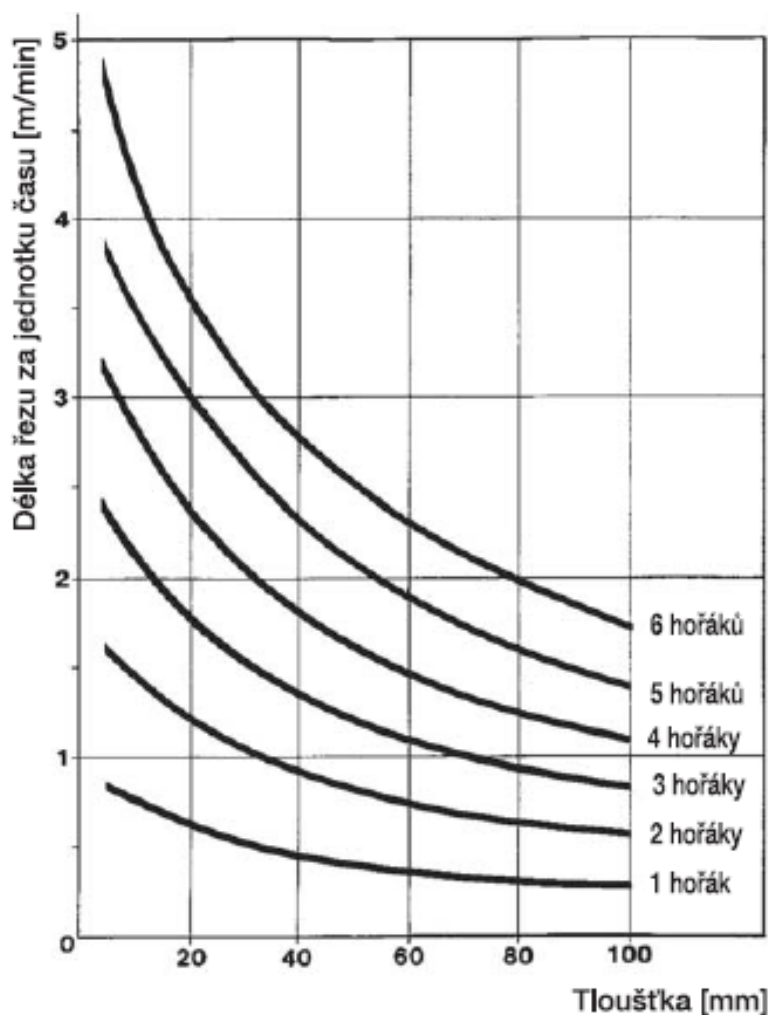
Řezná kapacita při řezání kyslíkem závisí na typu řezací dýzy a na použitém hořlavém plynu. Při použití acetyleny, což je plyn, který dává nejvyšší teplotu plamene a nejvyšší rychlost spalování v kombinaci s moderními vysoce výkonnými řezacími dýzami, je možné řezat nejrychleji. Na obrázku 9 je uvedena řezací kapacita různých typů řezacích dýz jako funkce tloušťky řezaných plátů.



Obrázek 9 Rychlost řezání se standardní dýzou a s dýzou pro vysoký výkon










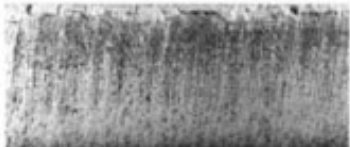
Předpokladem pro dosažení optimálních řezných rychlostí je správné nastavení řezacích parametrů, tj. především přehřátí a dále tlak řezacího plynu a hořlavého plynu; neméně záleží na použití řezacího zařízení s dynamicky stabilním pohybem.

Moderní zařízení na řezání kyslíkem jsou běžně osazena několika hořáky. Výhodou řezání několika hořáky současně je, že se řezná kapacita v metrech násobí počtem hořáků, viz obrázek 10. Tím se zlepšují ekonomické ukazatele řezacího procesu. Kromě hořáků „s vnitřním spalováním“ se dnes používají i hořákové systémy, které samy monitorují proces řezání a umožňují další automatizaci řezání kyslíkem – řezací program tak může běžet zcela automaticky.



Obrázek 10 Délka řezu za jednotku času při řezání několika řezáky na jednom stroji

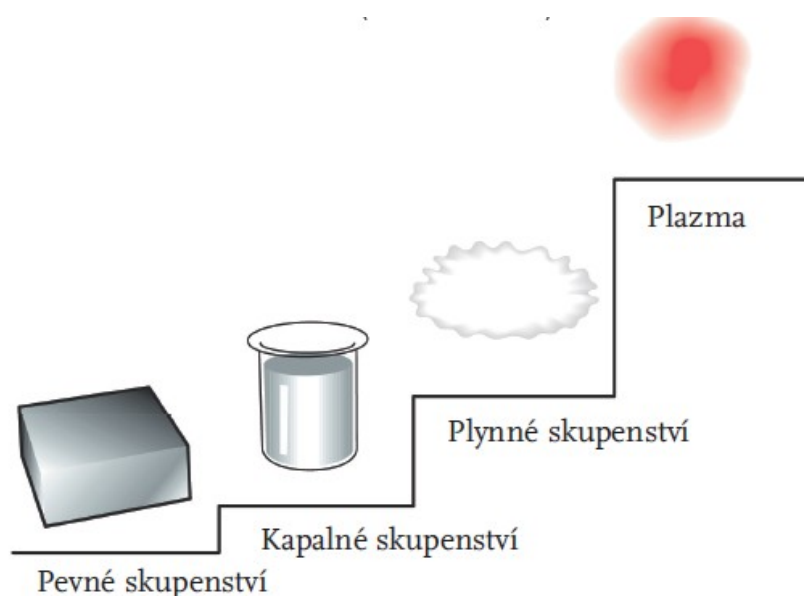
Při správném nastavení parametrů řezání a zajištění dynamické stability pohybu řezacího zařízení lze dosahovat vynikající kvalitu řezání. Na obrázku 11 jsou znázorněny formy řezné rýhy a povrchy řezu s drážkami po řezání kyslíkem – řezaným materiálem je ocel S 235JR o tloušťce 2, 3, 5, 8 a 10 mm. Při řezání dvoumilimetrového plechu byla použita speciální dýza na tenké profily pro tloušťky řezu 1 až 6 mm, zatímco k řezání ostatních tloušťek posloužila vysoce výkonná acetylenová řezací dýza pro tloušťky řezu 3 až 10 mm. Rychlost řezání je v normálním rozsahu pro řezání kyslíkem. Kvalitativní charakteristiky pro vzorky řezu jsou uvedeny v tabulce na pravé straně obrázku.

Řezy kyslíkem Hořlavý plyn: acetylen		Tloušťka plechu v mm	Řezná rychlost m/min	U_l mm	U_r mm	R_z μm	R_a μm	b mm
		2	0,75	0,1	0,1	24	3	0,9
		3	0,85	0,2	0,1	20	3	0,7
		5	0,75	0,1	0,1	18	3	0,7
		8	0,74	0,05	0,2	23	4	1,2
		10	0,72	0,1	0,15	32	6	1,4

Obrázek 11 Řezné spáry a povrchy řezu na dílcích plechu o různé tloušťce po řezání kyslíkem

5 Plazmové řezání

Plazma je čtvrtým skupenstvím hmoty – jinak může hmota být ve skupenství pevném, kapalném a plynném. Mezi jednotlivými skupenstvími jsou velké rozdíly a ty jsou dány úrovní energie. Dodáme-li plynu energii (ve velkém množství), vzroste teplota a elektrická vodivost, a molekuly se začnou disociovat na ionty a elektrony. Tak vzniká plazma a proces jejího vzniku se nazývá ionizace. Při řezání plazmovým obloukem se plyn ionizuje působením elektrického oblouku, viz obrázek 12.



Obrázek 12 Plazma – čtyři skupenství hmoty

Metoda plazmového řezání (PAC) byly vyvinuta v padesátých letech 20. století. Plazmou lze řezat veškeré elektricky vodivé materiály. Velkou výhodou plazmového řezání je vysoká rychlost řezání u tenčích materiálů.

Zpočátku se plazmová metoda uplatňovala především při řezání vysoce legovaných a nerezavějících ocelí a dále hliníku a mědi, tj. u materiálů, které se nedají řezat běžnou metodou řezání kyslíkem. Za posledních čtyřicet let bylo řezání plazmou značně zdokonaleno a nyní lze tímto postupem dosahovat velmi kvalitních řezů při vyšších

rychlostech, a to v širokém rozmezí tloušťek materiálů. V současné době je jakost nejdokonalejších postupů plazmového řezání srovnatelná i s jakostí laserového řezání.

Plazmové řezání je tepelným řezacím procesem. Materiál se taví paprskem ionizovaného plynu a vyfukuje se z řezné spáry. Řezání plazmou lze provádět ručně i strojně. Použitím různých plazmových plynů se dosahuje různá jakost řezu; požadovaná jakost závisí na účelu použití.

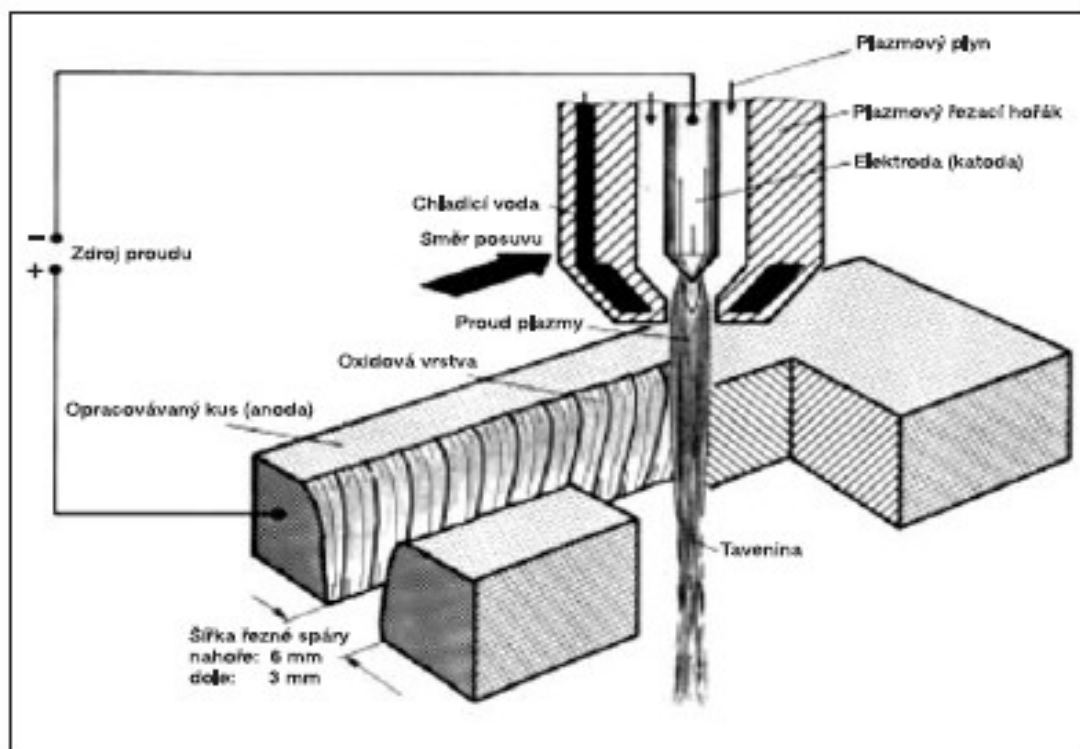
V současné době je k dispozici celá řada různých variant procesů, které se liší zejména konstrukcí plazmového řezacího hořáku a použitým katodovým materiálem. Jednotlivé varianty se volí podle typu řezaného materiálu, podle tloušťky řezu a podle výkonu zdrojů proudu plazmy.

5.1 Plazmový oblouk

Při svařování se plazmový oblouk definuje jako ionizovaný a disociovaný proud plynu, který je značně zúžen dobře chlazenou dýzou hořáku. Značně zúženým obloukem se tvoří relativně tenký proud plazmy o vysoké hustotě energetického toku na malé ploše opracovávaného kusu (např. 9000 [A/cm²] v případě řezání s jemným proudem plazmy).

Plazmotvorný nosný plyn se může skládat z jednoatomových nebo víceatomových plynů. Jednoatomové plyny, např. Ar a He, se částečně ionizují. Víceatomové plyny, např. N₂, O₂ nebo H₂, se disociují a částečně ionizují

5.2 Sled fází v procesu plazmového řezání



Obrázek 13 Schematické znázornění principu plazmového řezání

Na obrázku 13 je schematický znázorněn proces plazmového řezání, který lze popsat takto:

1. Zapne se přívod plazmového plynu – u některých hořákových systémů se zapne přívod pilotního plynu (např. argonu) – který proudí hořákem a dýzou.
2. Vysokou frekvencí se zažehne pilotní oblouk mezi elektrodou (katodou) a dýzou hořáku. V různých typech systémů se oblouk zažihá v argonové atmosféře. V novějších plazmových systémech se pilotní oblouk zapaluje bez vysoké frekvence.

3. Aktivuje se plazmový řezací proud a plazmový plyn, na který je konstruován hořák. Oblouk nyní hoří mezi katodou na jedné straně a opracovávaným kusem jako anodou na druhé straně. Jakmile tento oblouk začne hořet, deaktivuje se vysoká frekvence.

Proud řezací plazmy o vysoké teplotě nahřeje opracovávaný kus rekombinací, konvekcí a radiací, roztaví materiál v řezné spáře a způsobí vypařování taveniny.

4. Vysokou kinetickou energií plazmového plynu se vypuzuje tavenina.

5.3 Varianty metody plazmového řezání

V závislosti na použitém plazmovém plynu se rozlišuje mezi plazmovým tavným řezáním s inertním plazmovým plynem a oxidačním plazmovým plynem.

5.3.1 Plazmové tavné řezání s neoxidačním plazmovým plynem

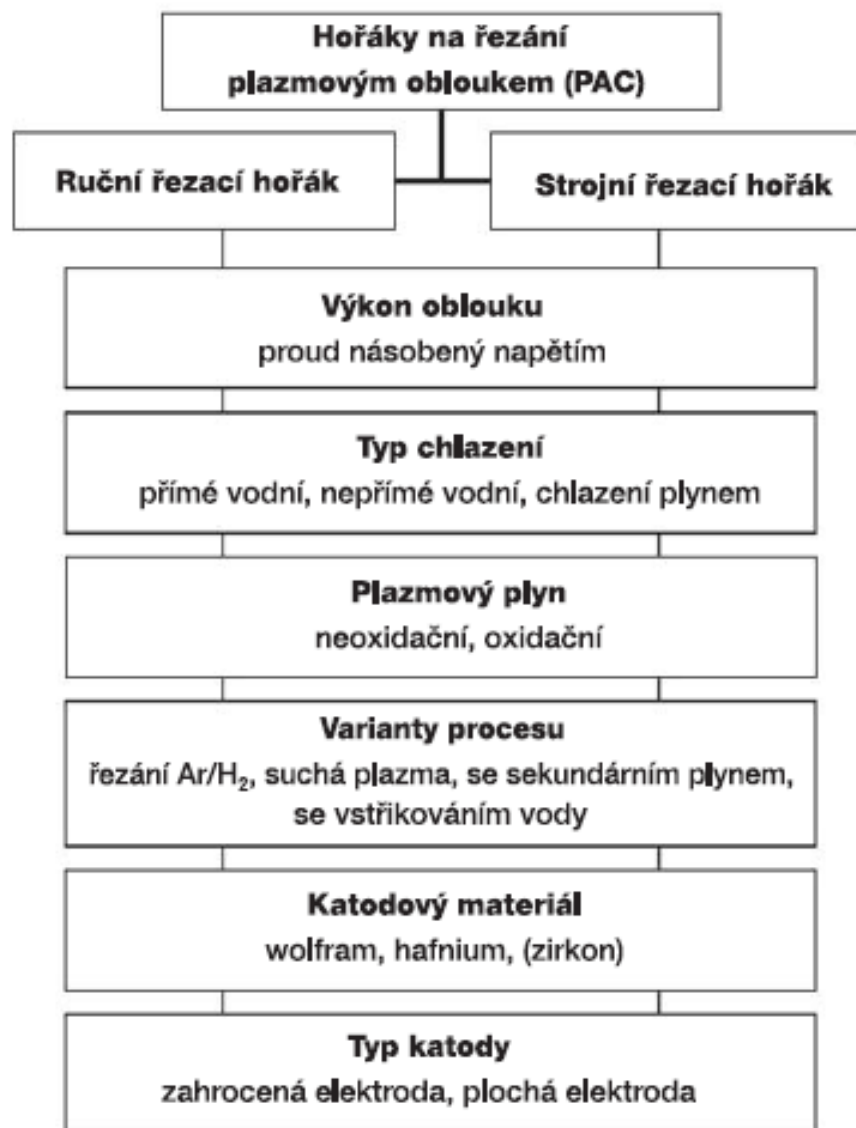
Jako plazmové plyny se mohou použít pouze takové plyny, které nereagují s wolframovou katodou – například N_2 , směsí Ar/H_2 nebo N_2/H_2 . Jestliže se jako plazmový plyn použije směs Ar/H_2 , hovoříme také o argon-vodíkové plazmové metodě.

5.3.2 Plazmové tavné řezání s oxidačním plazmovým plynem

Kyslík v plazmovém plynu zvyšuje u různých legovaných ocelí řezací výkon a snižuje tvorbu strusky. Elektrody, které se při této metodě používají, nesmí hořet v kyslíku. Používají se materiály (např. zirkon a hafnium), které jsou schopny ve spojení s kyslíkem vytvářet oxidační vrstvy, jež jsou obtížně tavitelné a zároveň jsou elektricky vodivé. Životnost elektrod a dýz je kratší než v případě plazmového řezání s inertním plynem.

5.4 Typy hořáků pro plazmové řezání

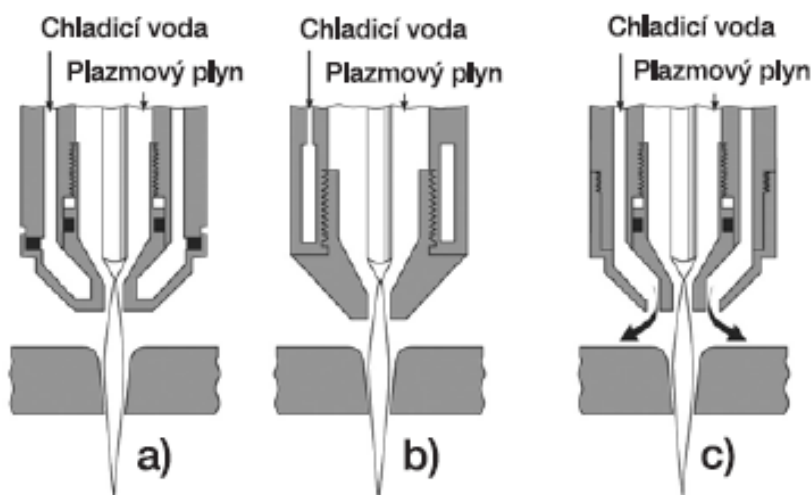
Pro různé varianty procesu plazmového řezání se používají různé konstrukce hořáků, různé typy elektrod a různé formy dýz. Na obrázku 14 jsou schematicky uvedeny možné konstrukce plazmových řezacích hořáků. V praxi se používají ruční i mechanické řezací hořáky. K ručnímu řezání se ve většině případů používají hořáky konstruované na nízký výkon.



Obrázek 14 Klasifikace hořáků na plazmové řezání

Zdroje proudu a řezací hořáky musí být konstruovány podle tloušťky řezaného kusu. Tenké plechy lze řezat pouze s použitím plazmových hořáků s plynovým chlazením pořízené za přiměřenou cenu. Doba, po kterou je zařízení zapnuto, je relativně krátká, aby nedošlo k přetížení hořáku nebo zdroje energie. K řezání materiálů o větší tloušťce slouží vysoce výkonné zdroje proudu a vodou chlazené plazmové hořáky. Tyto hořáky jsou většinou konstruovány v protáhlém tvaru jako mechanické řezací hořáky. K dispozici jsou plazmové řezací hořáky pro intenzity proudu do 1000 A.

Ke zvýšení kvality řezání a snížení ekologických vlivů byly vyvinuty nové varianty plazmových řezacích hořáků. Na obrázcích 15, 16 a 18 je schematicky znázorněna stavba řezacích hořáků používaných při jednotlivých způsobech řezání.



Obrázek 15 Schematické znázornění běžných plazmových řezacích hořáků s různými variantami chlazení: a) s přímým vodním chlazením; b) s nepřímým vodním chlazením; c) s chlazením plynem

5.4.1 Plazmové tavné řezání s oxidačním plazmovým plynem

Jde o běžnou metodu plazmového řezání. Tato varianta procesu řezání se často nazývá „suché plazmové řezání“. Proud plazmy se zužuje pouze dobře chlazenou řezací dýzou a magnetickým „pinchefektem“ (efektem zúžení). V praxi se používají různé systémy chlazení hořáků – například hořáky s přímým a nepřímým vodním chlazením a hořáky chlazené plynem viz obrázek 15.

Hořáky s pilotním plynem pro zažehnutí.

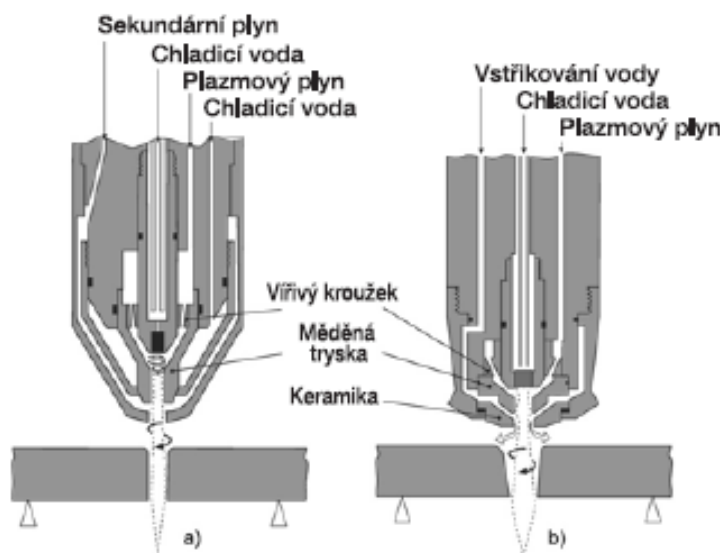
Hořák se zažehne nízkým zápalným napětím v argonové atmosféře. Po zažehnutí začne do hořáku proudit samotný plazmový řezací plyn, např. směs Ar/H₂ nebo N₂. U hořáků tohoto typu se řezací proud také často aktivuje postupně, po fázích.

Přívod plynu v hořáku.

Plazmový plyn uvnitř hořáku lze přivádět axiálním nebo tangenciálním směrem. V případě axiálního přívodu plynu se obvykle používají hrotové elektrody, zatímco v případě tangenciálního přívodu se používají ploché elektrody.

5.4.2 Plazmové řezací hořáky na proud sekundárního plynu

Vháněním sekundárního plynu, který proudí okolo plazmového oblouku a tvoří jakousi plynnou pochvu, dochází k dalšímu zúžení oblouku, takže hustota proudění energie a teplota proudu plazmy dále vzrůstají. Viz obrázek 16a. Tento typ hořáku při použití wolframových elektrod také umožňuje smísení reaktivních plynů – například vzduchu nebo dusíku – s proudem plazmy. Jestliže to dovoluje konstrukce hořáku a jestliže je zajištěn vhodný způsob přívodu plynu, lze tyto druhy hořáků použít i k řezání pod vodou.

















Obrázek 16 Plazmové řezací hořáky na sekundární médium: a) plazmové řezací hořáky na proud sekundárního plynu; b) plazmové řezací hořáky se vstřikováním vody

Novou variantou plazmového řezání se sekundárním plynem je řezání jemným proudem plazmy.

Řezání jemným proudem plazmy

Speciální konstrukce hořáků se zvlášť účinným přívodem sekundárního plynu v kombinaci s kyslíkem jako plazmovým plynem umožňují dosahovat vysokou kvalitu řezu – mnohem vyšší než s běžnými technikami plazmového řezání. Použitou konstrukcí

dýzy se proud plazmy extrémně zužuje a takto získaná energetická hustota je přibližně třikrát vyšší než u běžného hořáku. Řezná spára je přitom velice úzká a řezné hrany jsou téměř pravoúhlé. Viz obrázek 17. Takto dosažená kvalita řezání je přibližně srovnatelná s kvalitou řezání laserovým plamenem.

Řezání jemným proudem plazmy (kyslík)		Tloušťka plechu v mm	Řezná rychlost m/min	u mm	Rz μm	Ra μm	b mm
		1	3	0,15	11	1,3	1,3
		2	1,8	0,08	9	2	1,1
		3	1,2	0,09	31	8	1,2
		4	0,9	0,09	6	1,3	1,24
		6	0,55	0,17	7	1	1,25
		8	0,5	0,23	11	1,4	1,5
		10	0,45	0,25	12	3	1,5

Obrázek 17 Řezné spáry a povrchy řezu na dílcích plechu o různé tloušťce po řezání plazmou

Tato metoda se uplatňuje především v plazmovém řezání nelegovaných ocelí o tloušťce přibližně 6-8 mm s použitím kyslíku jako plazmového plynu. Díky speciálním vlastnostem kyslíku jako plazmového plynu – především nízká disociační energie, dobrá tepelná vodivost a snížené povrchové napětí kapének taveniny – získáváme řezy bez otřepků a vysoké řezné rychlosti, přičemž vyrobené díly lze dále použít bez dalšího opracování. Pro další svařování je výhodou i to, že řezné povrchy neabsorbují dusík, takže se snižuje riziko, že se při svařování vytvoří póry.

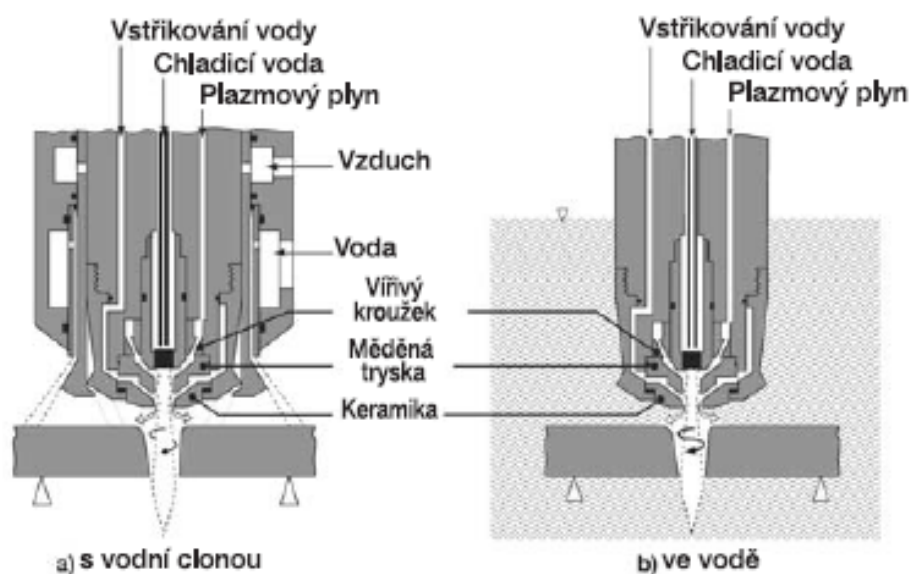
5.4.3 Plazmové řezání se vstřikováním vody

Tato varianta procesu řezání se nazývá plazmové řezání se vstřikováním vody. Zavedením vody mezi měděnou a keramickou dýzu dochází k dalšímu zúžení proudu oblouku. Tím se zvyšuje hustota proudění energie a teplota proudu plazmy. Viz obrázek 16 b. Při tomto procesu se vypařuje pouze malé procento vody. Zbývající voda ochlazuje povrch řezaného kusu a snižuje tvorbu oxidů na řezném povrchu. Dobré chlazení opracovávanému kusu vstřikovanou vodou spolu s vysokou řeznou rychlostí umožňuje řezání s minimálním protažením. V hořácích s wolframovými elektrodami se jako plazmový plyn používá vodík a v hořácích s hafniovými elektrodami se jako plazmový plyn používá kyslík. Pro stlačený vzduch doporučují výrobci zirkonové elektrody.

5.5 Snížení negativních ekologických vlivů při plazmovém řezání

Ke snížení negativních ekologických dopadů se plazmová řezací zařízení používají s různými bezpečnostními přípravky a řezacími stoly. Běžný řezací stůl s odsávacím naspodu nebo nad stolem není vždy dostačující.

Jako ekologicky šetrné techniky plazmového řezání se osvědčily především metody kombinované s vodou. Na obrázku 18 jsou znázorněny různé možné varianty.



Obrázek 18 Plazmové řezací hořáky pro snížení negativních ekologických vlivů: a) plazmové řezání s vodní clonou; b) plazmové řezání pod vodou

5.5.1 Plazmové řezání s vodní clonou

Vodní clona snižuje negativní ekologické dopady způsobené znečišťujícími látkami, hlukem nebo radiací, viz obrázek 18a. V závislosti na konstrukci plazmového řezacího hořáku může ochranná clona také být tvořena plynem (stlačeným vzduchem) nebo směsí stlačeného vzduchu a vody. V praxi se plazmové řezání s vodní clonou nejčastěji používá ve spojitosti s vodním řezacím stolem a s řezacím hořákem se vstřikováním vody.

5.5.2 Plazmové řezání s vodní lázní

V závislosti na použitém plazmovém řezacím hořáku se opracováváný kus v této variantě řezacího procesu řeže:

- nad vodou
- na vodě
- ve vodě

Na obrázku 18b je znázorněno plazmové řezání pod vodou. Cílem je zde snížení negativních ekologických dopadů dýmu, prachu, hluku a záření.






Při řezání hořákem se vstřikováním vody nebo řezání s plazmovým hořákem na proud sekundárního plynu se nejlepšího efektu dosahuje tehdy, je-li opracováváný kus ponořen 60-80 mm pod vodou. Vodní lázeň pohltí jen omezené množství oxidů dusíku. Ten se musí odsávat. Při plazmovém řezání ve vodě se požaduje více energie než při řezání v atmosféře. V praxi lze ve vodní lázni ekonomicky řezat stavební oceli do tloušťky 15 mm a také vysoce legované oceli. Na tlustší plechy je zapotřebí použít vodní clonu, případně sprchu vzduch/voda. Při řezání ve spojitosti s vodou, především pak ve vodní lázni, jsou zóna tepelného ovlivnění a výše tepelného zkreslení relativně malé a řezný povrch je téměř nezoxidovaný. V závislosti na druhu materiálu je třeba počítat se zakalením povrchu.

5.5.3 Plazmové řezání pod proudem vody

Proud vody slouží pro rychlé ochlazení a odplavení strusky z řezné spáry při plazmovém řezání. Tato varianta procesu se normálně používá ve spojitosti s metodou plazmového řezání se vstřikováním vody v řezacích zařízeních, kde je hořák pevný a plech se pohybuje ve směru os x a y .

5.6 Řezný výkon při plazmovém řezání

Řeznou kapacitu, které lze dosáhnout u jednotlivých řezných systémů, získáme z hodnot řezného proudu a napětí oblouku. Pro zajištění kvalitních řezů je k roztavení 1 g oceli zapotřebí přibližně 1 až 2 W elektrické energie – záleží na systému a na typu hořáku. Proto se při použití malých plazmových řezacích systémů o malém výkonu dají rychle rezat tenké plechy, zatímco u tlustších kusů je takové řezání relativně pomalejší. Na obrázku 19 jsou znázorněny tvary řezných rýh a řezné povrchy na plazmových řezech v plechu o tloušťce 2, 3, 5, 8 a 10 mm – materiál S235JR. Tyto řezy byly provedeny plazmovým řezáním se vstřikováním vody, což je proces, který pracuje při 240 až 390 A a při 120 až 150 V. Kvalitativní charakteristiky vzorků řezů lze vidět na pravé straně tabulky.

Plazmové řezy Plazmový plyn N_2		Tloušťka plechu v mm	Řezná rychlost m/min	U_l mm	U_r mm	R_z μm	R_a μm	b mm
		2	8,7	0,3	0,5	29	6	3,0
		3	5,5	0,5	0,8	18	3	3,7
		5	4,2	0,9	1,2	27	5	4,3
		8	3,8	1,1	1,5	12	2	5,5
		10	3,0	1,4	1,9	21	5	6,2

Obrázek 19 Řezné spáry a povrchy řezu na dílcích plechu o různé tloušťce po řezání plazmou

Při použití plazmových řezných systémů je velmi obtížné přesně definovat rychlost řezu. Z praktických zkušeností víme, že údaje od výrobců většinou představují maximální hodnoty. Uživatelé pracují na nižších řezných rychlostech, protože chtějí dosahovat kvalitních řezů, omezit zachycování strusky v řezu a snížit opotřebení katody a dýzy. Při vysokých hodnotách proudu v oblouku jsou katoda a dýza vystaveny velkému namáhání, čímž se zkracuje jejich životnost.

5.7 Plazmové plyny

Rozhodujícími kritérii pro plazmový plyn jsou vysoká ionizační energie, vysoká tepelná vodivost a velká atomová hmotnost.

Směs argon / vodík

Vzhledem k vysoké atomové hmotnosti argonu v kombinaci s příznivou tepelnou vodivostí vodíku jsou směsi Ar / H₂ ideálními plazmovými plyny pro řezy v tlustších kusech z oceli CrNi, z Al a ze slitin Al.

Dusík

Dusík je plyn o vysoké ionizační energii a s vysokou tepelnou vodivostí. Proto je velmi vhodný pro plazmové řezání. Používá se k řezání nelegovaných ocelí o menších tloušťkách. Dusík – ve směsi s vodíkem – se také hodí k řezání ocelí CrNi a hliníkových slitin.

Kyslík

Kyslík slouží především k řezání nelegovaných ocelí o menších tloušťkách opracovávaných kusů. Účinkem kyslíku na tavený materiál se snižuje viskozita taveniny a na získaném řezu neulpívá struska. Na rozdíl od dusíku nebo stlačeného vzduchu nezůstává po řezu kyslíkem na řezném povrchu dusík. Při svařování hran řezaných kyslíkem nehrozí tvorba pórů v důsledku přítomnosti dusíku.

Stlačený vzduch

Stlačený vzduch se jako plazmový plyn používá především při ručním řezání a při řezání tenkých ocelových plechů. Stlačený vzduch nesmí obsahovat olejové výpary a vlhkost. Stlačený vzduch kombinuje výhody kyslíku i dusíku.

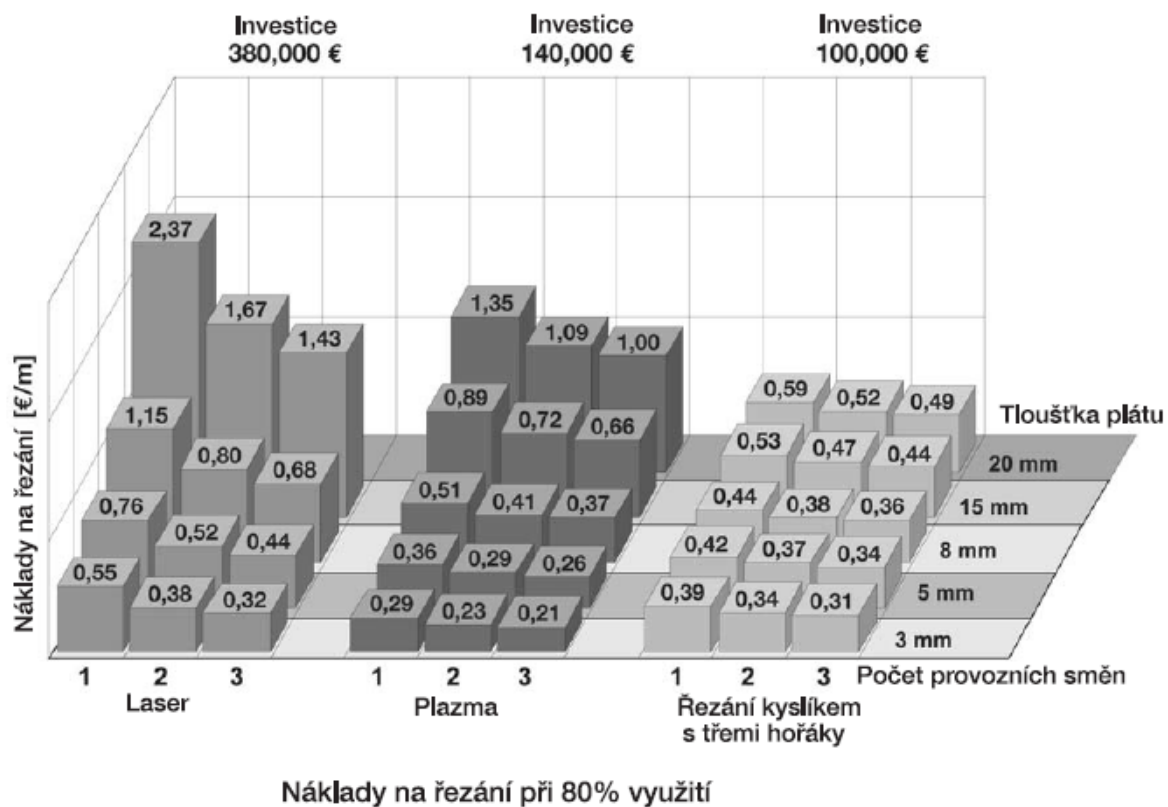
6 Porovnání řezání laserem, plazmou a kyslíkem

Popisují se různé varianty všech tří metod. U laserového řezání směřuje vývoj k vyšším kapacitám. K řezání ocelí CrNi, hliníku a jeho slitin se ve stále větší míře používá tavné laserové řezání při vyšších tlacích. Dále se popisují některé z mnoha možných variací plazmového řezání. K řezání nelegovaných nebo nízko legovaných ocelí se stále více uplatňuje metoda s použitím kyslíku jako plazmového plynu; tento způsob řezání je značně výhodný, především proto, že na řezném povrchu nezůstává dusík a na spodních hranách řezu neulpívá struska. Velmi dobré kvality řezu se dosahuje při řezání plazmou. U nelegovaných či nízko legovaných ocelí je stále nejvíce rozšířeno řezání kyslíkem. Při tomto řezání lze použít několik hořáků současně, čímž lze znásobit kapacitu řezání (délku provedeného řezu), viz obrázek 10.

Výhodou tohoto způsobu řezání je skutečnost, že lze pracovat s téměř každou tloušťkou řezaného materiálu a lze vyřezávat množství nejrůznějších tvarů. Řezací zařízení vybavená regulátory množství plynu a hořáky „s vnitřním spalováním“ s monitorováním procesu řezání umožňují plnou automatizaci provozu.

Při rozhodování pro ten či onen způsob řezání se v praxi přihlíží nejen k ekonomickým ukazatelům, ale také k řadě dalších faktorů. Patří k nim kvalita řezu, rozměrová tolerance, tolerance z hlediska pravoúhlosti hran, hloubka zářezu, tvar řezné spáry, šířka řezné spáry, kalení hran (ostří), deformace teplem, tloušťka plechů a plátů, typ materiálu, flexibilita řezacího systému, tvar komponent nebo další zpracování řezaného kusu.

Na obrázku 20 je graf s přehledem nákladů na metr řezu u všech tří způsobů řezu s uvedením nákladů stanovených v popisovaných příkladech – lze je tedy brát pouze jako příklad. Přímé porovnávání nákladů na tyto tři způsoby řezání není namístě. Ke zjištění, který ze všech způsobů je ekonomicky nejvýhodnější při zajištění dostatečné kvality je spíše třeba v každém konkrétním případě provést analýzu se zohledněním všech sledovaných vlivů. Pokud jde o řezání kyslíkem, v praxi se většinou pracuje na zařízeních s více hořáky – proto se na obrázku 20 uvádějí náklady při řezání se třemi hořáky.



Obrázek 20 Přehled nákladů na metr řezu u tří různých způsobů řezání

7 Údržba stroje

7.1 Preventivní údržba

Zhoršení životnosti spotřebních součástí je první známkou toho, že je něco špatného v plazmovém systému. Snížená životnost součástí zvyšuje provozní náklady dvěma způsoby: obsluha musí používat více elektrod a trysek pro odřezání stejného množství kovu a řezací práce se musí častěji přerušovat z důvodu výměny spotřebního materiálu.

Řádná údržba často eliminuje problémy, které zkracují životnost spotřebních součástí. Jelikož mzdové a režijní náklady často dosahují 80 % nákladů na řezání, zvýšená produktivita může významně snížit náklady na řezání.

Následující postup zahrnuje základní prvky preventivní údržby plazmových systémů.

7.1.1 Zdroj napájení

Při vypnutém napájení sejměte všechny boční panely. Pomocí stlačeného vzduchu odfoukněte všechny nánosy prachu a nečistot.

- Zkontrolujte poškození, opotřebení a uvolněné spoje kabelových svazků a spojů.
- Zkontrolujte nadměrnou bodovou erozi kontaktů hlavního stykače, která je charakterizována zčernalým hrubým povrchem na kterémkoliv kontaktu. Dojde-li k tomuto stavu, je doporučena výměna.
- Zkontrolujte nadměrnou bodovou erozi kontaktů relé řídicího oblouku, která je charakterizována zčernalým hrubým povrchem na kterémkoliv kontaktu. V případě potřeby relé vyměňte.

7.1.2 Chladicí systém

- Zkontrolujte filtrační element chladicího cirkulačního systému v zadní části napájecího zdroje. Má-li tento filtr nahnědlou barvu, vyměňte ho.
- Proveďte test průtoku chladiva dle pokynů v návodu, pak zkontrolujte těsnost systému.
- Místa přednostní kontroly jsou tato:
 - zadní část zdroje napájení
 - zapalovací konzola a
 - hlavní těleso hořáku
- Také zkontrolujte, zda v nádrži chladiva není špína či cizí částice. Ověřte, že je použito správné chladivo Hypertherm. Správné chladivo Hypertherm je červená kapalina.

7.1.3 Hlavní těleso hořáku

- Ověřte, že je vodní trubka rovná a že nemá na konci žádnou bodovou erozi.
- Zkontrolujte proudový kroužek uvnitř hlavního tělesa hořáku. Proudový kroužek musí být hladký a nesmí mít bodovou erozi. Není-li pozorována bodová eroze, vyčistěte proudový kroužek čistým bavlněným hadříkem a peroxidem vodíku.
- Vyčistěte všechny závity na přední části hlavy hořáku peroxidem vodíku a bavlněným hadříkem, čističem potrubí nebo čistým hadrem. Nepoužívejte líh. Poškození závitů je obvykle důsledkem špatného čištění závitů hořáku a pojistného krytu, takže se nečistoty a cizí částce mohou hromadit v závitech.
- Zkontrolujte, zda není izolátor hořáku prasklý. Zjistíte-li praskliny, vyměňte hořák.

- Zkontrolujte všechny O-kroužky na tělese hořáku a spotřebním materiálu. Ujistěte se, že je na tyto O-kroužky nanášeno správné množství maziva – tenká vrstva. Velké množství maziva může překážet průtoku plynu.
- Zkontrolujte, že pojistné a stínící kryty jsou řádně dotaženy k hlavnímu tělesu hořáku.
- Zkontrolujte opotřebení všech šroubení hadic na zadní část hořáku. Poškození závitů šroubení může naznačovat, že došlo k jejich přetažení.
- Zkontrolujte, že všechny spoje mezi hořákem a kabelem hořáku jsou pevné, ale nejsou přetažené.
- Při snímání spotřebních materiálů je vždy umísťujte na čistý, suchý povrch bez mastnot, protože špinavý spotřební materiál může způsobit nesprávnou funkci hořáku.

7.1.4 Průtoky plynů

- Kontrolujte všechny trasy plynu od přívodu plynu takto:
- Sejměte a zapojte přívodní šroubení plynu do plynové konzoly
- Natlakujte trasu plynu na 8,6 bar.
- Uzavřete ventil přívodu plynu u zdroje. Zkontrolujte tlakový pokles. Je-li přívodní trasou plynu hadice, může dojít k tlakovému poklesu 0,3 až 0,5 barů vlivem roztažení hadice.
- Opakujte pro každou linku od zdroje přívodu plynu. Jestliže jakýkoliv tlak neustále klesá, nalezněte netěsnost v systému.
- Drží-li se tlaky plynových tras na stabilní úrovni, proveďte test těsnosti systému dle pokynů v tomto návodu.

Zkontrolujte omezení hadic následovně:

- Zkontrolujte všechny hadice, zda nemají ostré ohyby, které by mohly omezovat průtok plynu.
- Používá-li řezný stůl kabelový dráhový systém pro podpěru kabelů od zdroje napájení k plynové konzole nebo hořákům, zkontrolujte umístění kabelů

v kabelovém systému pro zajištění toho, aby nebyly kabely překrouceny, což by mohlo způsobit omezení průtoku.

7.1.5 Kabelová spojení

- U všech kabelů je nutno kontrolovat otřepení nebo neobvyklé opotřebení. Je-li vnější izolace proříznuta či jinak poškozena, kabel vyměňte.

7.1.6 Zapalovací konzola

- Otevřete kryt a pomocí stlačeného vzduchu odfoukněte všechny nánosy prachu či nečistot. Je-li přítomna vlhkost, vysušte vnitřní prostor konzoly pomocí hadříku a pokuste se zjistit zdroj vlhkosti.
- Zkontrolujte sestavu jiskřiště. Zajistěte, že spoje vodičů k sestavě jiskřiště jsou pevné. Zkontrolujte, že dvířka konzoly jsou bezpečně uzavřená.
- Zkontrolujte kabely hořáků. Zajistěte jejich řádné utažení k vnější straně zapalovací konzoly.

7.1.7 Uzemnění systému

- Ověřte, že všechny součásti systému jsou jednotlivě uzemněny dle popisu v oddílech Instalace a Uzemnění v tomto návodu.
- Všechny kovové skříně, jako je zdroj, zapalovací konzola a plynová konzola, musí být jednotlivě připojeny k zemnicímu bodu. Tato připojení musí být provedena vodičem o průřezu 10 mm² nebo vodičem o ekvivalentním průřezu.
- Zkontrolujte spojení pracovního kabelu (+), zejména tam, kde je pracovní kabel (+) připojen k řezacímu stolu. Musí jít o dobré, čisté spojení, protože špatný spoj může způsobit problémy při přenosu oblouku.

7.2 Šablona harmonogramu preventivní údržby

Denně:

- ověřte správný tlak přívodního plynu
- ověřte správné nastavení průtoku plynu
- zkontrolujte hořák a dle potřeby vyměňte spotřební materiál

Týdně:

- vyčistěte zdroj napájení suchým vysušeným stlačeným vzduchem nebo vakuem
- zkontrolujte správnou funkci chladících ventilátorů
- vyčistěte závit hořáku a proudový kroužek
- zkontrolujte správnou hladinu chladiva

Tabulka 1 K dokladování preventivní údržby

Týden	Leden	Únor	Břez.	Duben	Květ.	Červen	Červ.	Srpen	Září	Říjen	Listop.	Pros.
1												
2												
3												
4												
5												

Jednou za 6 měsíců:

- vyměňte servisní součásti dle harmonogramu výměny servisních součástí

Jednou ročně:

- vyměňte servisní součásti dle harmonogramu výměny servisních součástí

Tabulka 2 Tabulka o provedení údržby

Rok	1. údržba	2. údržba

8 Porovnání nákladovosti spotřebních dílů

8.1 Úvod do problematiky

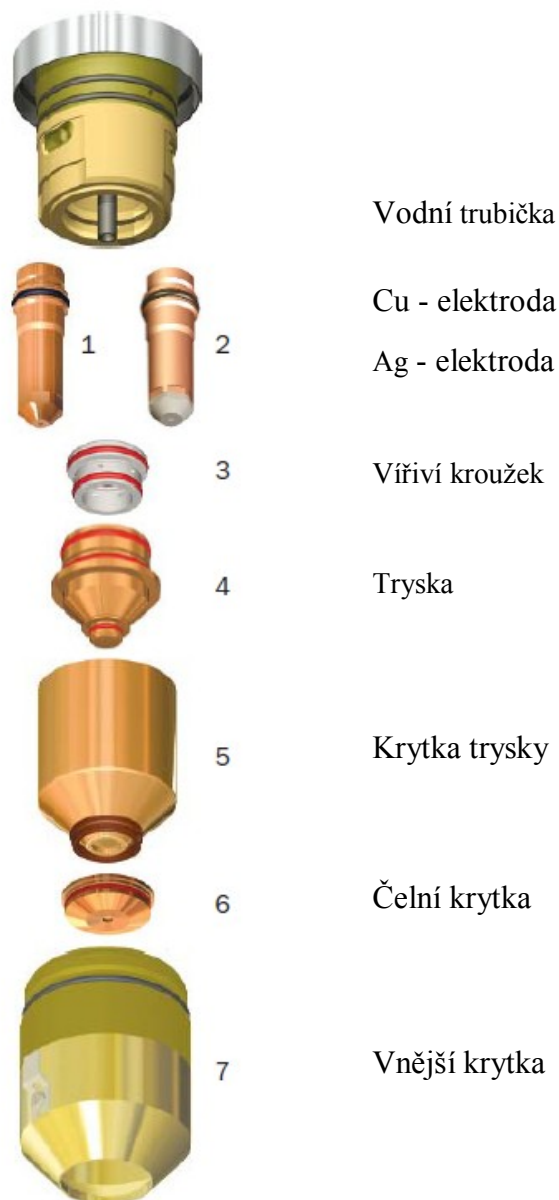
V současné době se roční náklady na nákup spotřebního materiálu od konkurenční firmy pohybují okolo 500 000 Kč. Firma Hypertherm, Inc. jakožto výrobce originálních dílů nás oslovila, abychom u nás ve firmě provedli analýzu ohledně životností a nákladovosti spotřebního materiálu. V rámci zlevnění provozu řezání plazmou, jsme na tuto analýzu přistoupili a já si vybral toto téma jako námět pro mou diplomovou práci.

Pro různé tloušťky řezaného materiálu se používají odstupňované řady spotřebního materiálu podle ampéry:

- 30A tloušťky cca od 1,5 – 3 mm
- 50A tloušťky cca od 3 – 6 mm
- 80A tloušťky cca od 3 – 10 mm
- 130A tloušťky cca od 6 – 15 mm
- 200A tloušťky cca od 10 – 20 mm
- 260A tloušťky cca od 15 – 30 mm

Pro testování byla vybraná technologie pro 260A, jelikož ji využíváme nejvíce. Plechy o tloušťce 20 – 30 mm řezeme v ročním objemu cca 100 000 m.

K testování bylo použito 10 sad spotřebního materiálu na řezání plazmou, tzn. 5 sad od firmy Hypertherm, Inc. a 5 sad od současného dodavatele. Jedna sada na řezání se skládá z těchto komponentů, viz obrázek 21.



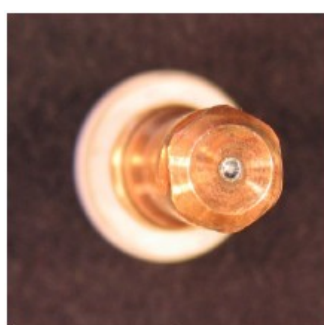
Obrázek 21 Složení sady spotřebního materiálu

Testování probíhalo na plazmovém technologickém procesu 260 Amper kyslík / stlačený vzduch. V testu byla používána Ag – elektroda, v běžném výrobním prostředí. Zaznamenávání dat bylo prováděno operátory pálicího stroje a mnou. Pro tyto účely jsem připravil tabulky v excellu viz obrázek 22. Všechny potřebné údaje uvažovala obsluha strojního zařízení do těchto tabulek a potom jsem je postupně přepisoval do tabulek v excellu v počítači.

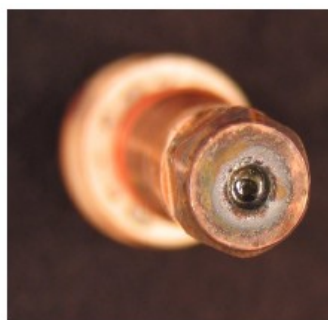
dokážeme změřit pomocí úchylkoměru (viz obrázek 23) její opotřebení. Na obrázku 24 vidíme různé stupně poškození elektrod.



Obrázek 23 Úchylkoměr k měření elektrod



Nová



Na konci životnosti

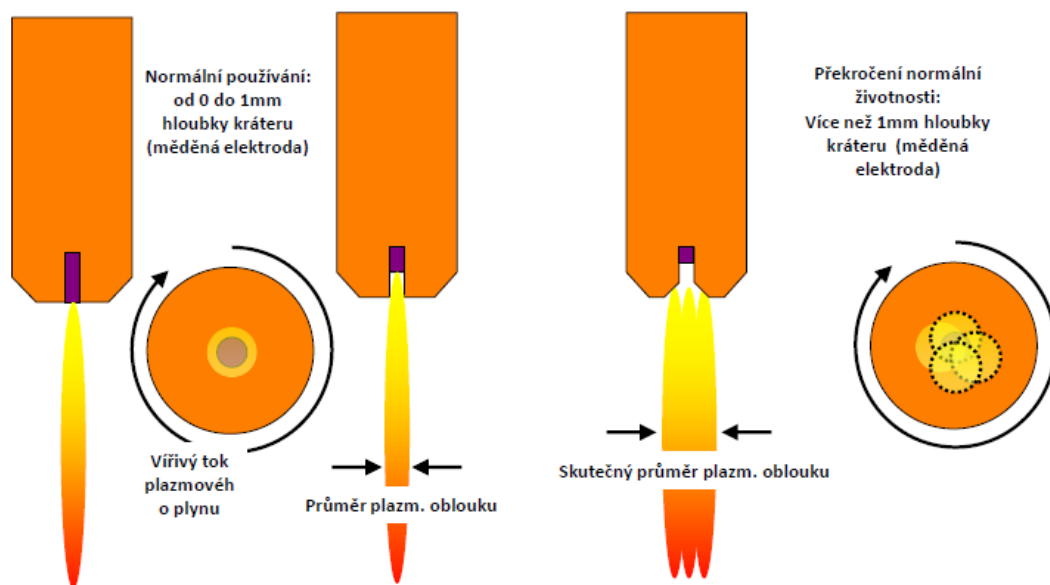


Nadměrně používaná

Obrázek 24 Různé stupně poškození elektrod

Opotřebená elektroda způsobuje rychlejší opotřebení trysky, jak o tom vypovídá obrázek 25.

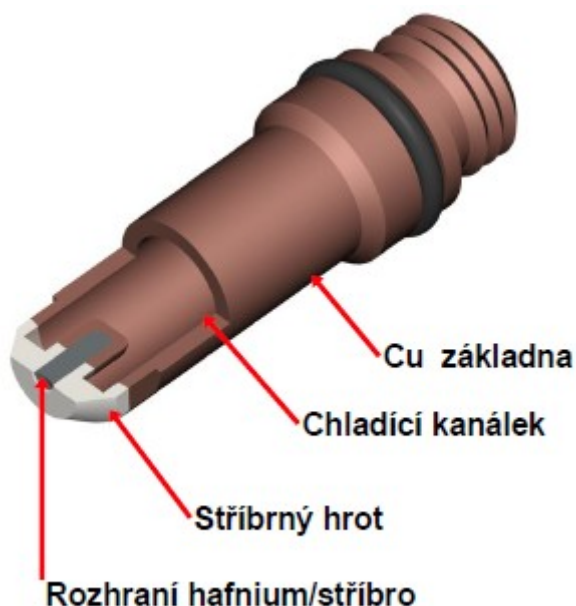
Životnost hafniové vložky je klíčovým faktorem životnosti spotřebních dílů



Obrázek 25 Vliv úbytků hafnia na průměr plazmového oblouku

8.3 Složení Ag - elektrody

SilverPlus elektroda neboli Ag - elektroda na obrázku 26, je významná nová technologie, která podstatně zvyšuje životnost spotřebních dílů při procesu plazmového řezání kyslíkem – až 2 x vyšší životnost elektrody oproti standardní Cu elektrodě.

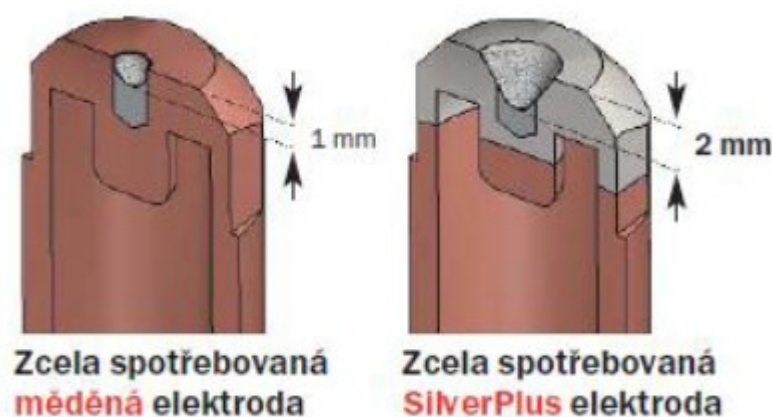


Obrázek 26 Ag – elektroda

Rozdíl mezi Cu - elektrodou a Ag - elektrodou je v konstrukci. Cu – elektroda je celoměděná a do měděného hrotu je vsazen hafniový valeček. Ag – elektroda je řešena spojením stříbrného hrotu s Cu základnou elektrody pomocí frikčního svařování, hafniová vložka je vsazena do stříbrného hrotu, koeficient odvodu tepla od hafniové vložky je významně navýšen.

Ag – elektroda od současného dodavatele se liší od výše popsané Ag – elektrody od firmy Hypertherm v tom, že je celostříbrná a do hrotu má vsazený hafniový valeček.

Tím je zabezpečeno zpomalení úbytku hafnia a zároveň je možno využívat tuto elektrodu s daleko větší prohlubní-kráterem oproti měděné elektrodě. Ag- elektroda se propálí téměř dvakrát hlouběji než standardní Cu – elektroda, čímž se životnost Ag – elektrody oproti standardní mědi zdvojnásobuje, viz obrázek 27.



Obrázek 27 Opatření Cu – elektrody a Ag - elektrody

8.4 Hafnium

Chemická značka **Hf**, (*lat. Hafnium*) je šedý až stříbřitě bílý, kovový prvek, chemicky velmi podobný zirkoniu.

Hafnium je v zemské kůře řídkým prvkem, jeho obsah se odhaduje na přibližně 4,5 mg/kg. V mořské vodě je jeho koncentrace natolik nízká, že ji nelze přesně určit ani nejcitlivějšími analytickými technikami. Udává se proto, že jeho obsah je nižší než 0,000 008 mg/l. Ve vesmíru připadá jeden atom hafnia na 200 miliard atomů vodíku.

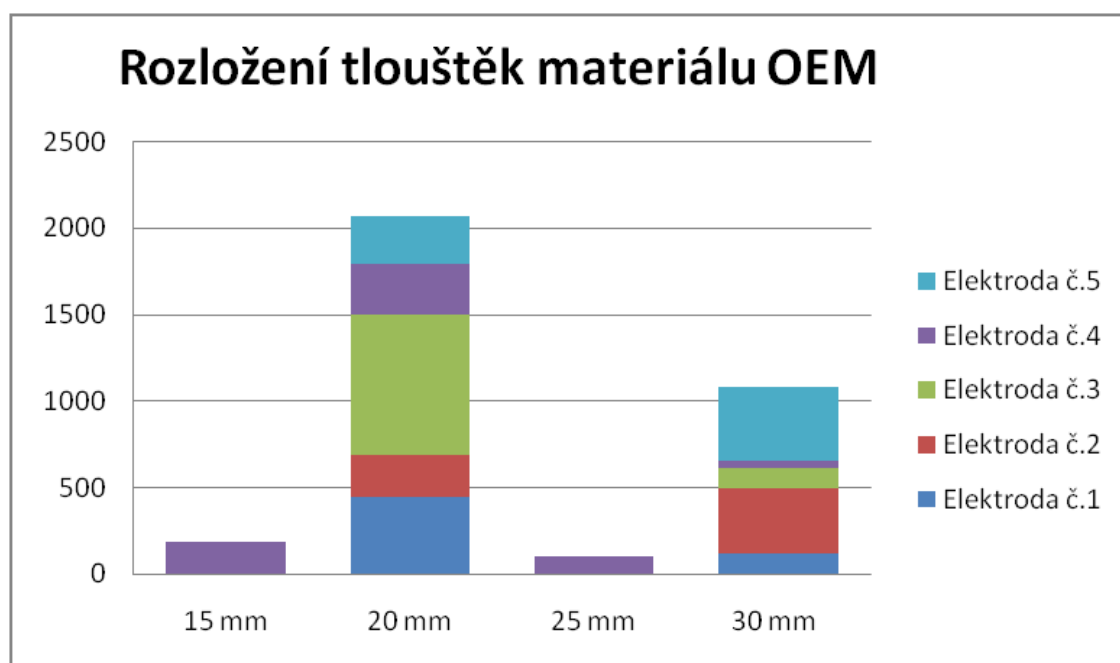
Průmyslová výroba hafnia spočívá především v jeho separaci od zirkonia, protože při Krollově procesu, který je dnes základním postupem pro rozklad a separaci zirkoniových rud je výsledným produktem směs Zr + Hf.

Jejich vzájemná separace se provádí frakční destilací chloridů.

8.5 Výsledky provedené analýzy

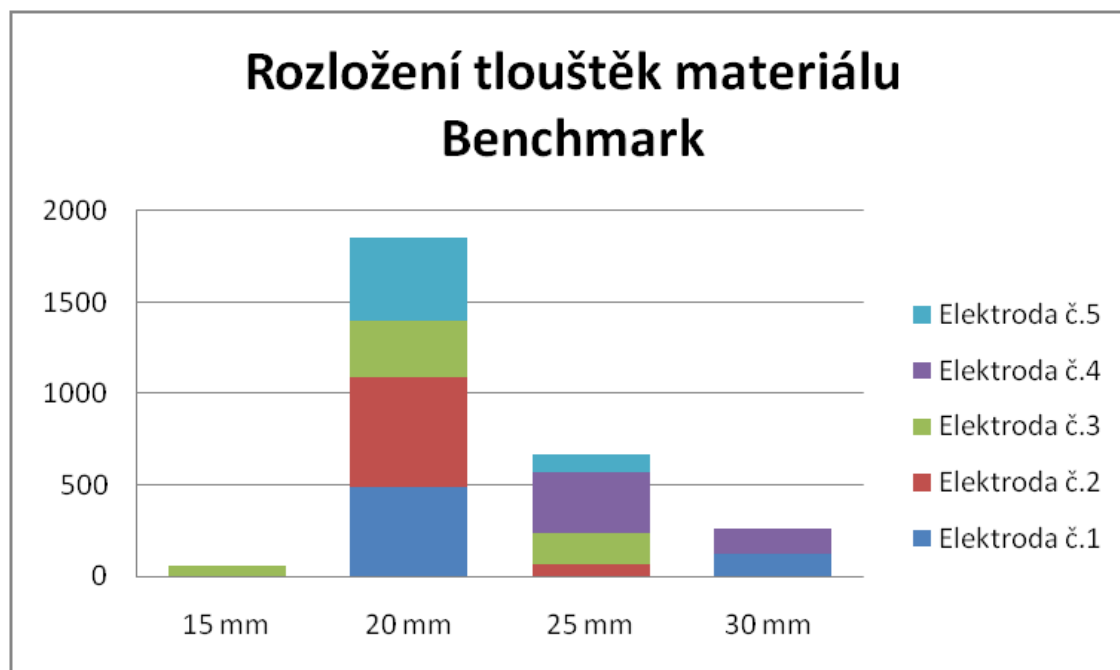
Pro potřeby analýzy jsme zvolili označení pro současného dodavatele spotřebního materiálů Benchmark a pro originálního výrobce OEM.

Obrázek 28 uvádí rozložení tloušťek materiálů, které byly použity během testu OEM elektrod. Osa Y grafu znázorňuje provozní minuty hoření plazmového oblouku. Procentuální rozložení jednotlivých tloušťek: 15 mm – 5,35%, 20 mm – 60,31%, 25 mm – 2,92 %, 30 mm – 31,42 %.



Obrázek 28 Spektrum tloušťek materiálů použitých v testu OEM

Obrázek 29 uvádí rozložení tloušťek materiálů, které byly použity během testu Benchmark elektrod. Osa Y grafu znázorňuje provozní minuty hoření plazmového oblouku. Procentuální rozložení jednotlivých tloušťek: 15 mm – 1,99 %, 20 mm – 65,47 %, 25 mm – 23,49 %, 30 mm – 9,20 %.



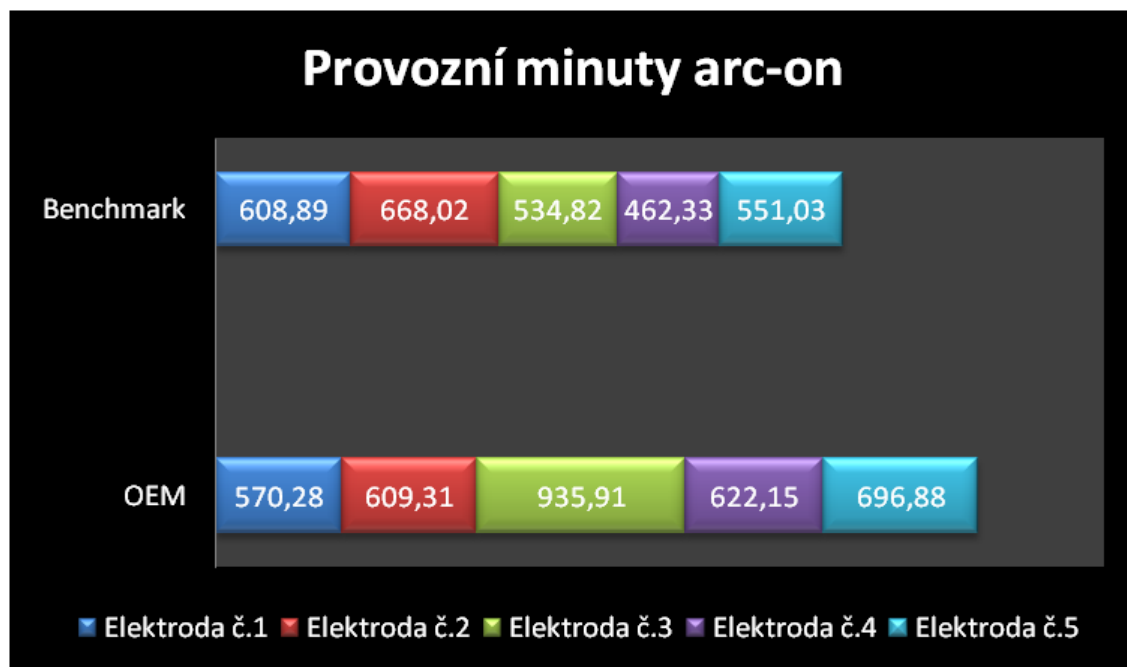
Obrázek 29 Spektrum tloušťek materiálů použitých v testu Benchmark

Podle obrázku 28 a 29 vidíme, že během testu bylo použito nerovného rozmístění tloušťek materiálů, jakost řezaných plechů v tomto testu zanedbáváme.

Porovnání součtu (provozní minuty hoření oblouku) viz obrázek 30.

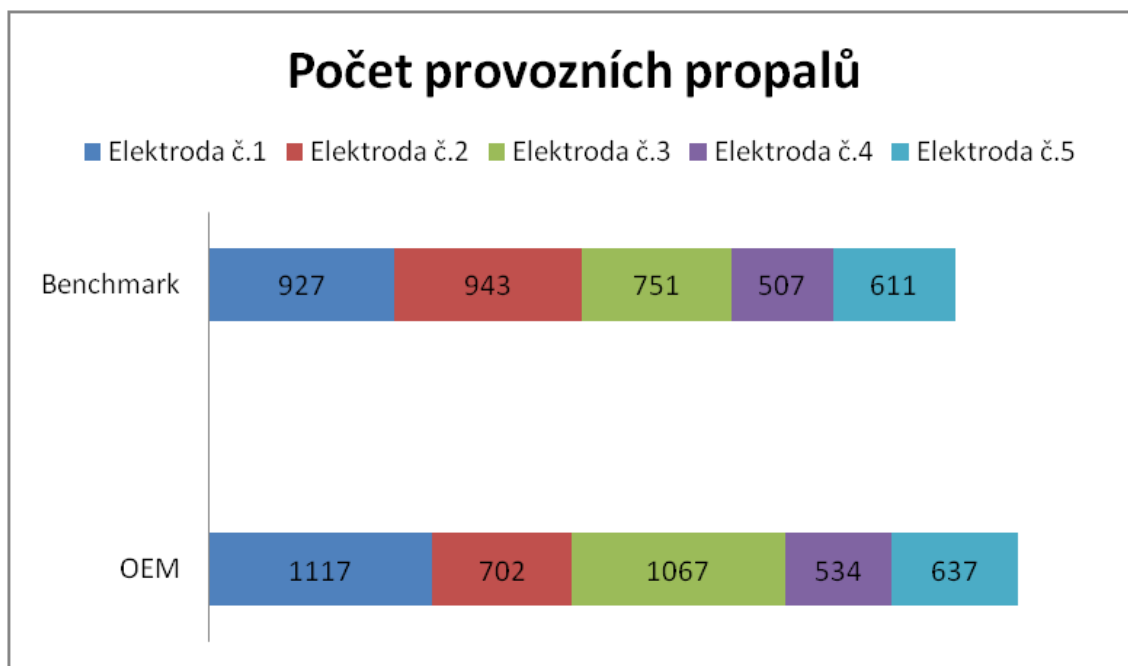
Součet provozních minut Benchmark: **2825,09 min**

Součet provozních minut OEM: **3434,57 min (1,215 vs. Benchmark)**



Obrázek 30 Porovnání součtu (provozní minuty hoření oblouku)

Provozní minuty hoření oblouku jsme vypočetli pomocí tabulek, které jsou součástí příloh DP. Součet nařezaných metru jsme podělili danou řeznou rychlostí.



Obrázek 31 Porovnání součtu (počet provozních propalů)

Počty propalů jsme získali součtem všech propalů v tabulkách, které jsou součástí přílohy této DP.

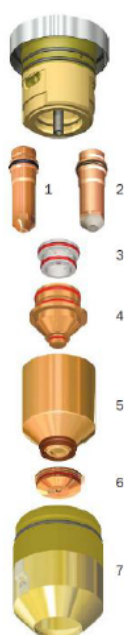
Tabulka 3 Shrnutí výsledků testování

Součtová data			
Spotřební díly	Počet propalů		Provozní minuty
	Celkový součet % k stáv. stavu		Celkový součet % k stáv. stavu
Benchmark 260 Amp HPR	3739	Bench mark	2825 Bench mark
OEM 260 Amp HPR	4057	108,5%	3434 121,57%

Výsledky testu HPR originálních dílů vůči stávajícímu dodavateli (benchmark):

- HPR originální díly vydrží o 8,5 % více propalů než benchmark
- HPR originální díly vydrží o 21,57 % více provozních minut než benchmark

8.6 Cenové porovnání

		Náklady při výměně 1 elektrody	
		Benchmark	OEM
	0 – Vodní trubička	264,00 Kč	373,23 Kč
	2 – Ag elektroda	405,00 Kč	295,13 Kč
	3 – Vířivý kroužek	325,00 Kč	365,01 Kč
	4 – Tryska	231,50 Kč	330,48 Kč
	5 – Krytka trysky	1 400,00 Kč	1 185,45 Kč
	6 – Čelní krytka	180,50 Kč	243,34 Kč
	7 – Vnější krytka	3 312,00 Kč	2 614,25 Kč
		6 118,00 Kč	5 406,89 Kč
		754,17 Kč	774,63 Kč

Obrázek 32 Cenové porovnání

8.7 Kalkulace provozních nákladů

Porovnání nákladů - výsledky testu: provozní hodiny/1 rok - (2.025 prov. hodin / 1 rok)						
Druh SD	Díl	Cena	Pož. množství /1 rok	Náklady	Celkové náklady	Náklady / 1 propal
HPR originál	Elektroda	295,13 Kč	177	52 238,08 Kč	137 312,87 Kč	0,95 Kč
	Tryska	330,48 Kč	177	58 494,99 Kč		
	Vířivý kroužek	365,01 Kč	6	2 190,05 Kč		
	Krytka vnitřní	1 185,45 Kč	6	7 112,72 Kč		
	Čelní krytka	243,34 Kč	71	17 277,04 Kč		
HPR Benchmark	Elektroda	405,00 Kč	216	87 480,00 Kč	164 280,00 Kč	1,00 Kč
	Tryska	231,50 Kč	216	50 004,00 Kč		
	Vířivý kroužek	325,00 Kč	8	2 600,00 Kč		
	Krytka vnitřní	1 400,00 Kč	8	11 200,00 Kč		
	Čelní krytka	180,50 Kč	72	12 996,00 Kč		
Náklady na 1 provozní minutu, HPR originál						1,13 Kč
Náklady na 1 provozní minutu, HPR benchmark						1,35 Kč

Obrázek 33 Kalkulace provozních nákladů

Úspory za 1 kalendářní rok:	26 967,13 Kč (16,42%)
Úspory na 1 provozní minutu:	0,22 Kč (16,42%)
Úspory na 1 provozní propal:	0,05 Kč (5%)

Obrázek 34 Výpočet úspory

9 Závěrečné hodnocení

Zástupce firmy Hypertherm Inc. konstatoval, že elektrody byly využívány do konce své teoretické životnosti, v některých případech i za ní. Což je zadokumentováno i v tabulkách které byly vytvořeny pro každou elektrodu každou zvlášť, viz přílohy této DP.

Během testu při používání spotřebních dílů od Benchmarku nenastaly žádné problémy, jinými slovy operátoři byli spokojeni se spotřebním materiálem. Problém ale nastal při používání spotřebních dílů od OEM. Operátoři strojního zařízení začali mít potíže s čelní krytkou, na kterou se nalepovala tavenina. Tato čelní krytka se po zahřátí začínala chovat jako magnet a docházelo k ucpávání dírek v čelní krytce. Stroj během řezání musel být odstavován, aby obsluha mohla tento problém vyřešit, vyčištěním této čelní krytky. Tím se řezání stávalo méně produktivní než v případě používání Benchmarku.

Na tento problém nám zástupci Hyperthermu Inc. nabídli řešení. Navrhli nám upgrade hořáku, který by tento problém podle nich vyřešil. V tomto případě jde o další investici do strojního zařízení. Jedná se o hořák typu 400XD a už by kalkulována úspora za kalendářní rok neměla, dle mého názoru vyznám. Za další vzhledem k tomu, že používáme zdroj o 260A, tak by tento hořák nebyl 100 % využíván.

Závěrem jde teda konstatovat, že v testů životnosti sledovaných součástek, trysek a Ag – elektrod firma Hypertherm Inc. uspěla, ale vyvstal problém s jinou součástí a to čelní krytkou, která problém změny dodavatele postavila do úplně jiné roviny.

Můj osobní pohled na věc je, kdyby se zakoupila vyšší řada zdroje, tzn. HyPerformance HPR400XD společně s hořákem 400XD, tak provést změnu dodavatele. V jiném případě nemá význam dodavatelé spotřebního materiálů měnit.

10 Seznam použité literatury

- [1] Mair, H., Plebuch, F, C. *Porovnání procesů tepelného řezání*, Zvláštní edice Linde, E29/95.
- [2] Linström, J., Brodén, G., *Řezání plazmou*.
- [3] Firemní materiály firmy Hypertherm, Inc.
- [4] Firemní materiály firmy MGM.
- [5] Firemní materiály firmy Linde.

11 Přílohy

Seznam příloh:

Příloha A	Souhlas se zveřejněním jména firmy
Příloha B	Tabulka pro elektrodu č. 1 od OEM
Příloha C	Tabulka pro elektrodu č. 2 od OEM
Příloha D	Tabulka pro elektrodu č. 3 od OEM
Příloha E	Tabulka pro elektrodu č. 4 od OEM
Příloha F	Tabulka pro elektrodu č. 5 od OEM
Příloha G	Tabulka pro elektrodu č. 1 od Benchmark
Příloha H	Tabulka pro elektrodu č. 2 od Benchmark
Příloha I	Tabulka pro elektrodu č. 3 od Benchmark
Příloha J	Tabulka pro elektrodu č. 4 od Benchmark
Příloha K	Tabulka pro elektrodu č. 5 od Benchmark
Příloha L	Protokol o předání spotřebních dílů